Ciência e Tecnologia dos Materiais

Prof. Carlos Eduardo Tavares

2009

ÍNDICE

CAPÍTULO I 2
PROPRIEDADES GERAIS DOS MATERIAIS 2
1.1 Introdução 2
1.2 Ligações Químicas (Revisão) 3
1.2.1 Ligação Iônica 4
1.2.2 Ligação Covalente 5
1.2.3 Ligação Metálica 5
1.2.4 Ligações Secundárias 6
1.3 Propriedades Físicas 6
1.3.1 Massa, volume e densidade 6
1.3.2 Estado Físico 7
1.4 Propriedades Elétricas 8
1.4.1 Condutividade e Resistividade Elétrica 8
a) Condução nos sólidos 10
b) Condução nos líquidos 10
c) Condução nos gases 10
1.4.2 Resistência e Condutância Elétrica 11
1.4.3 Permissividade Dielétrica 12
1.4.4 Rigidez Dielétrica 13
1.5 Propriedades Magnéticas 13
1.5.1 Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética 13
1.6 Propriedades Mecânicas 14
1.6.1 Deformação nos metais 14
1.6.2 Outras propriedades mecânicas 16
1.7 Propriedades Térmicas 16
1.8 Propriedades Químicas 18
1.8.1 Radiação 18
1.8.2 Oxidação 18
1.8.3 Corrosão 19
1.9 Propriedades Ópticas 20
1.9.1 Refração 20
1.9.2 Reflexão 21
1.9.3 Absorção 21
1.10 Bandas de Energia 22
1.11 Classificação dos Materiais Elétricos 22
CAPÍTULO II 23
MATERIAIS CONDUTORES 23
2.1 Introdução 23
2.2 Características dos Condutores 24
2.2.1 Variação da resistividade com a temperatura e a freqüência 24
2.2.2 Resistência de contato nos metais 26
2.3 Materiais de elevada condutividade 26
2.3.1 Cobre e suas Ligas 26

2.3.2 Alumínio e suas Ligas 29
2.3.3 Chumbo (Pb) 31
2.3.4 Estanho (Sn) 31
2.3.5 Prata (Ag) 32
2.3.6 Ouro (Au) 32
2.3.7 Platina (Pt) 33
2.3.8 Mercúrio (Hg) 33
2.3.9 Zinco (Zn) 33
2.3.10 Cádmio (Cd) 34
2.3.11 Níquel (Ni) 34
2.3.12 Cromo (Cr) 35
2.3.13 Tungstênio (W) 35
2.3.14 Ferro (Fe) 36
2.3.15 Carvão, Carbono e Grafite 37
2.4 Materiais de elevada Resistividade 39
2.4.1 Ligas de Aquecimento 39
2.4.2 Ligas de Medição 40
2.4.3 Ligas de Regulação 40
2.5 Aplicações 41
2.5.1 Resistores 41
2.5.2 Fusíveis 45
2.5.3 Bimetais 48
2.5.2 Fios e cabos condutores 52
2.6 Supercondutores 53
CAPÍTULO III 58
MATERIAIS ISOLANTES 58
3.1 Polarização Dielétrica 58
3.2 Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente 59
3.3 Aplicações 61
3.3.1 Capacitores 61
3.4 Comportamento dos dielétricos em Serviço 68
3.4.1 Resistência de Isolamento 68
3.4.2 Resistência Superficial 68
3.4.3 Rigidez Dielétrica 69
3.4.4 Rigidez Dielétrica Superficial 69
3.4.5 Ruptura dos Dielétricos 69
3.4.6 Efeito Corona 69
CAPÍTULO IV 70
MATERIAIS SEMICONDUTORES 70
4.1 Níveis de Energia 71
4.2 Valência 72
4.3 Bandas de Energia 73
4.4 Materiais Intrínsecos 73
4.5 Condução Elétrica nos Semicondutores 74
4.6 Semicondutores do Tipo N e P 74
4.7 Aplicações 75
4.7.1 Diodo Semicondutor 75
4.7.2 Transistor de Junção Bipolar 81
4.7.3 Transistor de Unijunção 84

4.7.4 Transistor de Efeito de Campo 85
4.7.6 Retificador controlado de silício 88
4.7.7 Termistores 88
4.7.8 Fotocondutores 89
4.7.9 Células Fotovoltaicas 90
CAPÍTULO V 93
MATERIAIS MAGNETICOS 93
5.1 Classificação dos Materiais Magnéticos 94
5.2 Características dos Materiais Magnéticos 96
5.2.1 Retentividade 96
5.2.2 Relutância 96
5.2.3 Permeância 96
5.2.4 Permeabilidade 96
5.2.5 Permeabilidade Relativa 97
5.2.6 Meios de Propagação do Fluxo Magnético 97
5.2.7 Intensidade de Campo Magnético 97
5.2.8 Densidade de Fluxo 98
5.2.9 Força Magnetomotriz 99
5.2.10 Curva de Magnetização (BxH) 99
5.2.11 Laço de Histerese 100
5.3 Lei de Faraday e Lei de Lenz 102
5.4 Circuitos Magnéticos Equivalentes 103
5.4.1 Circuito Magnético em Entreferro de Ar 105
5.5 Aplicações dos Materiais Magnéticos 107
5.3.1 Eletroímãs 108
5.3.2 Relés 109
5.3.3 Contatores 110
5.3.4 Disjuntores Termo-magnéticos 111
5.3.5 Campainha 115
5.3.6 Motores e Geradores Elétricos 115
5.3.7 Transformadores 117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 118

CAPÍTULO I

PROPRIEDADES GERAIS DOS MATERIAIS

1.1 Introdução

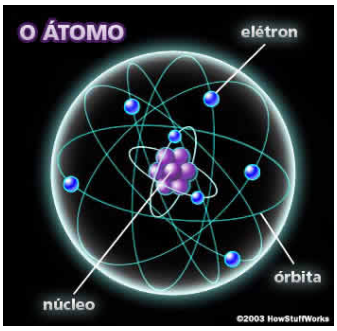
O objetivo da disciplina Ciência e Tecnologia dos Materiais é habilitar os estudantes de Engenharia Elétrica a distinguir e recomendar os diversos materiais utilizados em equipamentos e componentes elétricos e magnéticos, correlacionando as propriedades dos metais, ligas, materiais cerâmicos, semicondutores, plásticos e outros tipos de polimerizados com suas propriedades estruturais, além de conhecer as tendências atuais e perspectivas futuras no campo da ciência dos materiais

Apesar do enorme progresso ocorrido na área de engenharia e ciência dos materiais nos últimos anos, ainda há desafios tecnológicos, inclusive considerações sobre o impacto ambiental da produção dos materiais. A grande maioria dos engenheiros em algum ponto de sua carreira se deparará com algum problema de projeto envolvendo a seleção de materiais. Não existe um conjunto padrão de procedimentos a serem seguidos na escolha de materiais corretos para determinada aplicação. Cada situação é diferente e requer conhecimento sobre os materiais e sobre as condições às quais eles estarão sujeitos. Entretanto existem alguns pontos gerais que fornecem um ponto de partida:

- Qualquer material selecionado precisa possuir propriedades consistentes com as condições de serviço;
- É necessário considerar os efeitos das mudanças destas condições para fora dos limites da normalidade;
- Para selecionar um material apropriado, primeiro liste os materiais possíveis e então elimine alguns em função das características não adequadas em relação às propriedades, ou ainda, falta de segurança ou custo. Se os materiais restantes na lista não preencherem os requisitos há ainda algumas opções, tais como tratar os materiais de maneira apropriada (térmica ou quimicamente), mudar o ambiente de serviço, produzir uma liga que tenha os efeitos específicos desejados, etc.

Este primeiro capítulo apresenta uma revisão sobre ligações químicas e conceitos básicos relacionados às propriedades elétricas, mecânicas, térmicas, químicas, etc. Nos capítulos seguintes serão vistos os materiais condutores, semicondutores, isolantes e magnéticos.

1.2 Ligações Químicas (Revisão)



O átomo é composto por um núcleo circundado por elétrons. O núcleo é composto por prótons e nêutrons. Os elétrons são partículas carregadas e com 1/1836 da massa de um nêutron.

A carga do elétron é convencionalmente negativa. Como os elétrons são componentes de todos os átomos, sua carga elétrica é freqüentemente tomada como unidade. Em unidades físicas, a carga do elétron vale 1,6 x 10-19 C.

Sabemos que um próton possui uma carga que é numericamente igual a do elétron, só que de sinal oposto. Por exemplo, o átomo de hidrogênio, o mais simples de todos, é composto de um próton e de um elétron e é eletricamente neutro.

De uma forma simplificada, um átomo de um certo elemento pode ser considerado como sendo uma combinação de prótons e nêutrons em um núcleo circundado por elétrons. Como a massa de um elétron é 0,0005 da massa de um próton ou de um nêutron, a massa total de um átomo é aproximadamente proporcional ao número de prótons e nêutrons no núcleo. A massa atômica é expressa em gramas por átomo-grama. Um átomo-grama sempre contém 6,02x1023 átomos (número de Avogadro).

$$\textbf{Massa do átomo} = \frac{\textbf{massa atômica}}{\textbf{6,02x10}^{23}}$$

Com exceção da densidade e calor específico, o fator massa atômica exerce uma influência relativamente pequena sobre as propriedades dos materiais. O número de elétrons que circundam o núcleo de um átomo neutro é mais significativo. Este número, denominado número atômico, é igual ao número de prótons no núcleo.

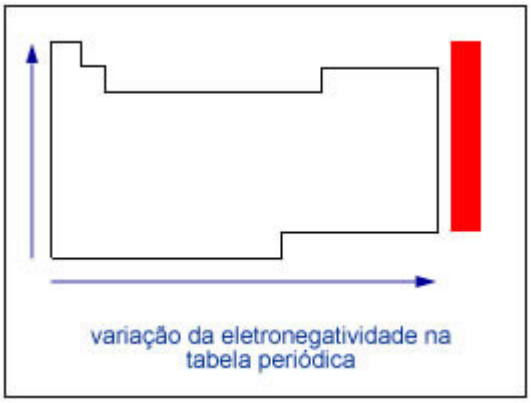
Os elétrons que circundam o núcleo do átomo não têm todos o mesmo nível energético, sendo divididos em vários níveis, com propriedades energéticas diferentes (quatro números quânticos).

As atrações interatômicas, forças que mantém os átomos unidos, também estão relacionadas à estrutura eletrônica dos átomos. Em um fio de cobre estas forças são fortes (caso contrário o metal se deformaria facilmente), já nos gases nobres, tais como He,Ne,A,etc, existe apenas uma pequena atração pelos outros átomos porque eles possuem um arranjo muito estável de oito elétrons (2 para o He) na sua camada mais externa, chamada de valência. A maior parte dos outros elementos, ao contrário dos gases nobres, deve adquirir a configuração altamente estável de oito elétrons na camada mais externa, através de um dos seguintes mecanismos:

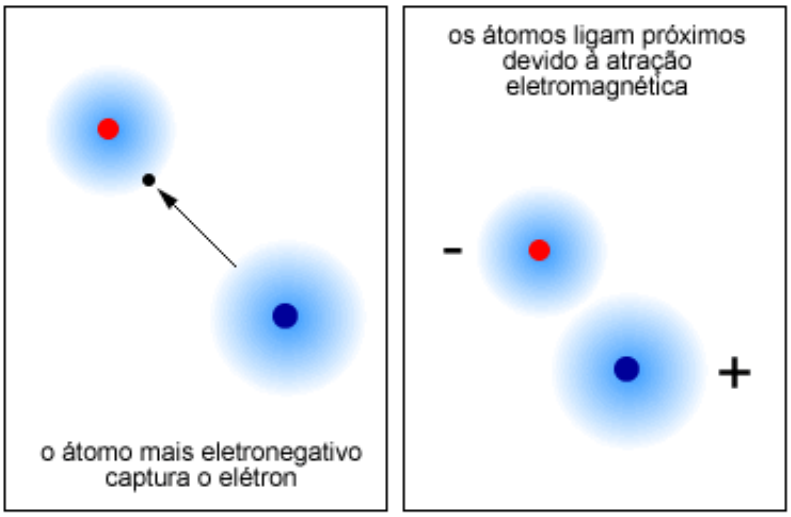
- recebendo elétrons,
- perdendo elétrons,
- compartilhando elétrons.

1.2.1 Ligação Iônica

Este tipo de ligação resulta da atração mútua entre íons positivos e negativos. Átomos de elementos como o sódio e cálcio, com um e dois elétrons na camada de valência, respectivamente, perdem facilmente estes elétrons externos e se tornam íons positivos. Por outro lado, os átomos de cloro e oxigênio facilmente recebem um ou dois elétrons na camada mais externa, respectivamente, de modo a completar oito elétrons nesta camada. À "força" que o átomo tem de capturar elétrons dos outros (vencer o "cabo de guerra"), damos o nome de eletronegatividade. Assim um átomo é fortemente eletronegativo quando tem facilidade em "roubar" os elétrons dos outros.



Aproximando um átomo altamente eletronegativo de um de baixa eletronegatividade, ele captura elétrons tornando-se um íon negativo e tornando o outro um íon positivo. Como cargas elétricas opostas se atraem, eles ficarão ligados por atração eletromagnética e o tipo de ligação será chamada de ligação iônica.



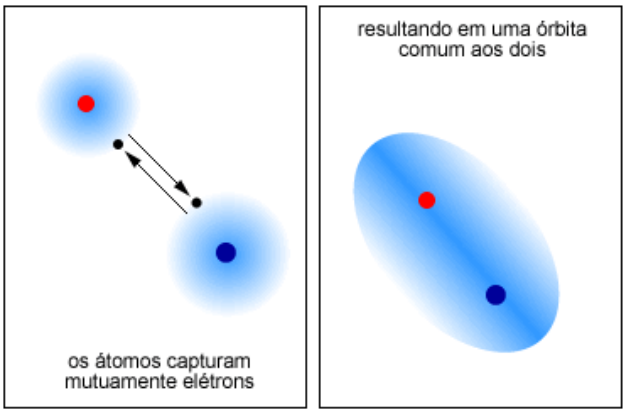
Ligação iônica

Na realidade uma carga negativa é atraída por todas as cargas positivas e uma carga positiva por todas as negativas. No sal de cozinha, por exemplo, as ligações entre os íons sódio e cloreto são iônicas. Conseqüentemente os íons de sódio ficam envolvidos por íons cloreto, e os íons cloreto por íons de sódio Geralmente ligações iônicas se formam entre um metal e um ametal. O átomo do ametal tem uma configuração eletrônica semelhante a de um

gás nobre, quase totalmente preenchida de elétrons. Eles tem alta eletronegatividade, e facilmente ganham elétrons formando um íon negativo ou ânion. Os dois ou mais íons logo se atraem devido a forças eletrostáticas. Ligações desse tipo são mais fortes que ligações de hidrogênio, e têm força similar às ligações covalentes.

1.2.2 Ligação Covalente

Este é outro tipo de ligação forte. Se aproximarmos dois átomos de forte eletronegatividade, um não terá força para capturar o elétron do outro permanentemente. Ele captura o elétron, mas o outro consegue capturá-lo de volta e, além de retomá-lo, captura um elétron do outro. Esse "jogo" fica se repetindo fazendo com que o par de elétrons (um de cada átomo) fique orbitando pelos dois átomos. É importante perceber que nesse caso não há formação de íons. Esse tipo de ligação, onde não há transferência definitiva de elétrons, e sim compartilhamento do par, resultando em uma distribuição eletrônica mais estável, é designada por ligação covalente.

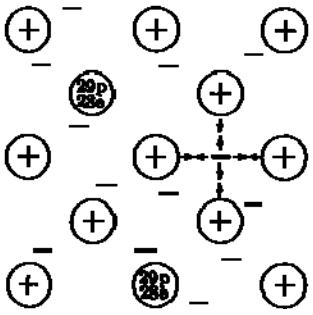


Ligação covalente

Ligações covalentes normalmente ocorrem entre átomos com eletronegatividades similares e altas (geralmente entre dois não-metais), dos quais remover completamente um elétron requer muita energia. Portanto, a ligação covalente implica em intensas forças de atração entre os átomos, o que é evidenciado, por exemplo no diamante, que é o material mais duro encontrado na natureza e inteiramente constituído por carbono. Outra demonstração da força desta ligação covalente (onde cada átomo compartilha seus 4 elétrons da camada de valência com 4 átomos adjacentes) também pode ser percebida pela temperatura extremamente elevada (>3000^{o}. C) a que pode ser aquecido antes da destruição da sua estrutura.

1.2.3 Ligação Metálica

A ligação metálica é outro tipo de atração interatômica forte. Se um átomo apresenta apenas uns poucos elétrons de valência, estes podem ser removidos com relativa facilidade, enquanto que os demais elétrons são firmemente ligados ao núcleo. Isto origina uma estrutura formada por íons positivos e elétrons "livres", como pode ser visto na figura a seguir.

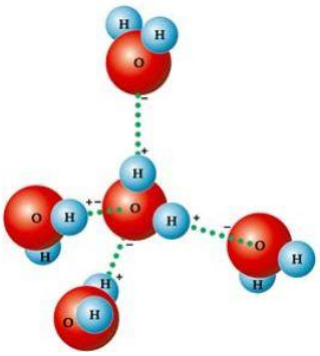


Ligação metálica

1.2.4 Ligações Secundárias

Existem também forças secundárias que ligam moléculas umas às outras. Estas ligações são fracas em relação às outras. Estas forças aparecem a partir dos dipolos atômicos ou moleculares.

Os dipolos elétricos existem sempre que existir alguma assimetria entre as partes positivas e negativas dos átomos e moléculas.



A ligação resulta da atração coulombiana entre um pólo positivo e a região negativa do adjacente. Apesar de uma molécula de água ser eletricamente neutra como um todo, a distribuição de carga pela molécula não é uniforme. Esta força pode ser atrativa em relação a outros grupos similares, por exemplo, íons hidroxila (OH-) em moléculas orgânicas que atraem moléculas de água. Estas forças são conhecidas como ligações de hidrogênio e existem em algumas moléculas que têm o hidrogênio como um dos seus constituintes. Outro Exemplo de ligações secundárias são as forças de Van der Waals (forças devido a polarização das moléculas).

1.3 Propriedades Físicas

1.3.1 Massa, volume e densidade

A **densidade** (ρ) corresponde à relação massa/volume de uma amostra de um material. Embora a massa e o volume sejam propriedades extensivas, a razão dos seus valores é constante para um determinado material, para um certo valor de temperatura. A densidade é, portanto, uma propriedade característica de uma substância, sendo usada como indicativo do grau de pureza da substância de que é feito um dado material.

$$\text{densidade } (\rho) = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

No Sistema Internacional de Unidades, a densidade exprime-se em **kg m^{-3}** (kg/m^3). Contudo, no laboratório é usual exprimir a densidade em **g cm^{-3}** (g/cm^3). A determinação da densidade de uma substância passa, pois, pela determinação prévia da massa e do volume de uma amostra dessa substância, calculando-se em seguida o valor do quociente respectivo.

Densidade característica de algumas substâncias (a 4ºC)	
Substância	**Densidade (g cm^{-3})**
Acetona	0,79
Antraceno	1,28
Ácido benzóico	1,07
Ciclohexano	0,79
Etanol	0,79
Ferro	7,8
Naftaleno	0,96
Cobre	8,9
Alumínio	2,7
Azeite	0,92

É comum encontrarmos o termo massa específica (μ) em lugar de densidade (ρ).

Usa-se "densidade" para representar a razão entre a massa e o volume de objetos sólidos (ocos ou maciços), e "massa específica" para líquidos e substâncias.

1.3.2 Estado Físico

a) **Estado sólido** é quando os átomos das moléculas constituintes da matéria estão em um estado de agitação baixo, podendo ser concentrados mais átomos em um mesmo espaço físico. A sua forma e volume são fixos. Em aplicações eletrotécnicas são usados como condutores na fabricação de fios, cabos e barramentos (cobre, alumínio e ligas metálicas), dielétricos em capacitores (mica, cerâmicas e plásticos), isoladores (porcelana, vidro e borracha), estrutura de suporte e núcleos magnéticos (ferro e suas ligas), entre outros.

b) **Estado líquido**, o corpo mantém a quantidade de matéria e aproximadamente o volume; a forma e posição relativa da partículas não se mantém. É particularmente estudado nas áreas da hidrostática e da hidrodinâmica. Em aplicações eletrotécnicas são usados em relés para contato (mercúrio) solução iônica em baterias (eletrólitos) , como isolantes em transformadores (óleos minerais), tintas e vernizes isolantes, etc.

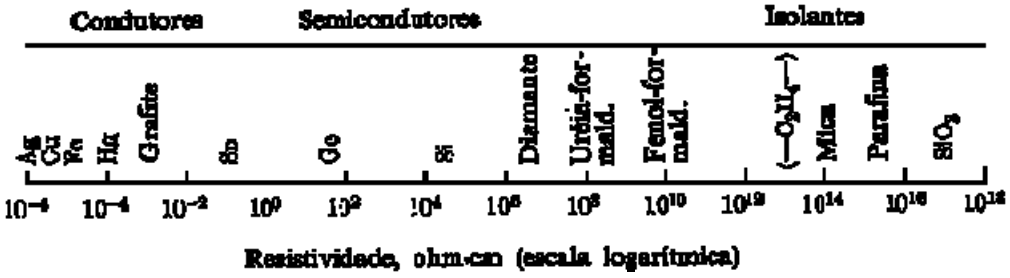
c) **Estado gasoso**, o corpo mantém apenas a quantidade de matéria, podendo variar amplamente a forma e o volume. É particularmente estudado nas áreas da aerostática e da aerodinâmica. Em aplicações eletrotécnicas são usados

principalmente em lâmpadas (neon, vapor de sódio, vapor de mercúrio e fluorescente – argônio + mercúrio), como meio isolante entre cabos aéreos (o ar) e cabos subterrâneos e disjuntores de potência (hexafluoreto de enxofre – SF6)

1.4 Propriedades Elétricas

1.4.1 Condutividade e Resistividade Elétrica

A carga elétrica pode ser conduzida por íons ou elétrons cuja mobilidade varia para os diferentes materiais formando um completo espectro de resistividade/condutividade, como mostrado na figura.



Espectro de resistividade

A **condutividade elétrica** quantifica a disponibilidade ou a facilidade de circular corrente elétrica em um meio material submetido a uma diferença de potencial. Sua definição física é dada por:

$$\sigma = n\ e\ \mu_n + p\ e\ \mu_n$$

onde:
σ = condutividade elétrica do material (S/m, onde S= siemens; ou ainda $\Omega^{-1}m^{-1}$;
n = Concentração de elétrons livres do material (cm^{-3} ou m^{-3})
p = concentração de cargas livres positivas do material (cm^{-3} ou m^{-3}), chamadas lacunas
e = carga elétrica elementar = $1{,}6022x10^{-19}$ C (C= Coulombs)
μ_n, μ_n = mobilidade dos elétrons livres e das lacunas (m^2/Vs)

Elétrons livres e lacunas são chamados portadores de carga livre, pois reagem a campos elétricos e magnéticos e podem se locomover facilmente pelo material com pouco fornecimento de energia. Estão presentes em todos os tipos de materiais, mas as lacunas apenas nos semicondutores. Portanto, a equação da condutividade para materiais condutores e isolantes é expressa apenas pela primeira parcela da equação anterior.

A **resistividade elétrica** ρ de um material pode ser entendida como a maior ou menor oposição que este material impõe a um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Expressa, portanto, o inverso da condutividade e pode ser dada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu_n + pe\mu_p}$$

Onde a unidade da resistividade ρ pode ser dada por Ωm.

A resistividade elétrica depende da temperatura. Por exemplo, nos materiais condutores a resistividade aumenta com o aumento da temperatura e nos isolantes diminui. A tabela abaixo mostra a resistividade de alguns materiais a 20^{o}C.

Material	Resistiviade ρ (Ω.m)
Condutores	
Prata	$1{,}58\times 10^{-8}$
Cobre	$1{,}67\times 10^{-8}$
Alumínio	$2{,}65\times 10^{-8}$
Tungstênio	$5{,}6\times 10^{-8}$
Ferro	$9{,}71\times 10^{-8}$
Semicondutores	
Carbono (grafite)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$
Germânio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$
Silício	0,1 - 60
Isolantes	
Vidro	$10^{9} - 10^{12}$
Borracha	$10^{13} - 10^{15}$

A resistividade elétrica de um material pode também ser obtida numericamente através da medida da resistência entre os centros das faces opostas de um corpo de prova homogêneo do material, com dimensões unitárias, expressa por:

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

Onde R é a resistência elétrica (Ω), A é a área da seção transversal do material (m^2) e l é o comprimento do material (m).

A resistividade está diretamente relacionada com a perda de energia na forma de calor (efeito Joule) que ocorre em qualquer material percorrido por corrente elétrica devido ao choque dos elétrons com os seus átomos. Desta forma, quanto menor a resistividade do material

menores serão as perdas de energia e melhor será o material para o transporte da corrente elétrica. Por isto, a importância de se considerar tais características ao se estudarem condutores e semicondutores visto que materiais isolantes e magnéticos não são usados para este fim.

Um elétron normal que se desloca pela rede cristalina de um condutor vai se chocando com os átomos da rede, perdendo energia e aquecendo o material. Isso é chamado de "efeito Joule" e ocorre em todo condutor normal.

a) Condução nos sólidos

Nestes materiais existem elétrons livres que podem se deslocar com um movimento que depende da temperatura e de outras condições físicas a que estejam sujeitos. Estes elétrons estão constantemente submetidos a um movimento de agitação térmica, com velocidades da ordem dos 100 km/s, movimento desordenado e equilibrado no seu conjunto, não constituindo portanto uma corrente elétrica.

Se, no entanto, esta substância for sujeita a um campo elétrico, os elétrons vão sendo arrastados no seu movimento, formando assim uma corrente elétrica.

O sentido positivo desta corrente foi arbitrado como o contrário ao do deslocamento dos elétrons. A corrente elétrica dá-se a uma velocidade muito mais baixa que a da agitação térmica, na ordem dos cm/s.

Quando são arrastados os elétrons se chocam com as moléculas do material condutor, perdendo parte da sua energia sob a forma de calor.

b) Condução nos líquidos

Pela hipótese de Arrenhius sabemos que, quando se dissolve um ácido, uma base ou um sal na água, dá-se a dissociação das suas moléculas em íons que podem se deslocar no seio do líquido. Sob a ação de um campo elétrico estes íons, positivos ou negativos, irão se deslocar em sentidos contrário, de acordo com a respectiva carga.

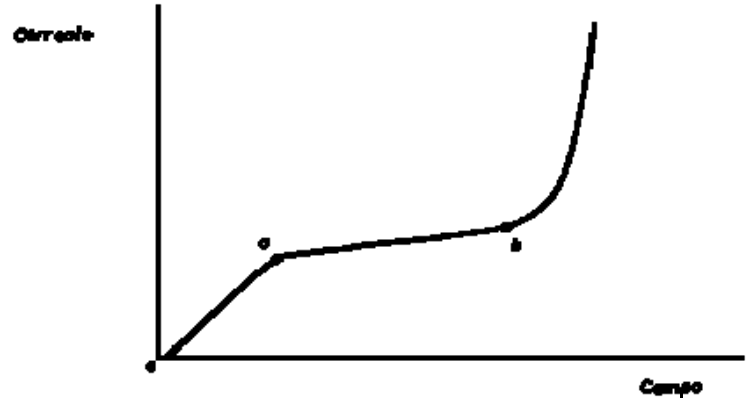
Daqui se conclui que a corrente elétrica nos eletrólitos é conduzida de forma diferente da que ocorre nos condutores sólidos, já que nos líquidos há movimento nos dois sentidos. As acelerações dos anions e cátions são diferentes porque dependem das suas massas e sua carga elétrica.

c) Condução nos gases

Um gás à pressão atmosférica é considerado um bom isolante, mas se for submetido a um campo elétrico suficientemente forte, ele deixa de o ser.

Quando o campo atinge um determinado valor alguns elétrons se libertam dos átomos ficando estes conseqüentemente com carga positiva. A este fenômeno é dado o nome de ionização do gás. Se, uma vez o gás ionizado, nele existir um campo elétrico, haverá através dele a passagem de uma corrente elétrica, geralmente acompanhada de efeitos luminescentes. O número de moléculas ionizadas num gás é sempre pequeno em comparação com o que se passa nos líquidos. De fato, considera-se uma boa ionização quando existe uma molécula ionizada para cada 1012 moléculas de gás.

Quando a causa da ionização desaparece, o gás mantém a condutividade por alguns instantes, mas esta vai diminuindo até desaparecer. Isto mostra que os íons voltam a se combinar. A curva que nos permite ter uma idéia da variação da corrente com o campo elétrico, suposto uniforme nos gases ionizados, supondo-se ainda que se mantém constante a causa da ionização é mostrada na Figura 1.6.



Variação da corrente com o valor do campo elétrico.

Dela tiramos que, para campos muito pequenos (entre 0 e a), existe uma proporcionalidade entre a corrente e o campo.

Entre a e b dá-se como que uma saturação e o aumento da corrente é insignificante. Isto se explica pelo fato que a causa da ionização pode produzir apenas uns tantos íons na unidade de tempo e por unidade de volume do gás e, uma vez que a corrente atinja um valor correspondente ao transporte de todos estes íons na unidade do tempo, ela não pode crescer mais, qualquer que seja o crescimento do campo.

Para campos superiores a b, dá-se como que uma libertação e a corrente aumente livremente.

Até aqui supusemos a corrente transportada pelos íons que vão sendo arrastados para os eletrodos, animados de pequena energia cinética, incapaz de dissociar as moléculas com que vão chocando com grande freqüência pois, estando o gás a uma pressão normal, é grande a densidade de moléculas, o que por sua vez não permite o aumento da energia cinética dos íons.

Assim, a ionização não aumenta e o gás permite apenas a passagem de uma corrente de intensidade relativamente baixa.

Se o campo elétrico aumenta acima de determinado valor, a energia cinética dos íons consegue aumentar a ponto de o seu choque de encontro às moléculas poder dissociá-las. A ionização vai progredindo rapidamente até que as moléculas por dissociar se tornam escassas e o fluxo de íons e elétrons deixa de encontrar resistência. É a descarga. O valor de campo elétrico para o qual se verifica a descarga depende também da pressão a que o gás se encontra submetido.

1.4.2 Resistência e Condutância Elétrica

As cargas elétricas deslocam-se sob a forma de corrente elétrica através das diferentes substâncias, mas sob aspectos diversos. Chama-se de **resistência** a maior ou menor dificuldade que opõe um condutor à passagem de corrente elétrica, cuja unidade é o Ohm (Ω).

A resistência elétrica R obedece a lei de Ohm (V=RI) e pode ser entendida como a avaliação quantitativa da resistividade, pois depende da geometria do material.

A resistência de um objeto é função da resistividade do seu material, da área da seção reta e do seu comprimento. Estes três parâmetros relacionam-se conforme a equação abaixo:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \Omega$$

Onde:
R: resistência da haste, em ohms
ρ: resistividade do material, em ohms.m
l: comprimento da haste, em m
A: área da seção reta, em m^2

Condutância elétrica é o inverso da resistência elétrica. A unidade derivada do SI de condutância é o siemens (símbolo S, igual a Ω^{-1}). Não deve ser confundida com condutividade elétrica, que é uma característica específica de um material e recíproca a resistividade elétrica.

1.4.3 Permissividade Dielétrica

Quando um material condutor isolado for mergulhado em um campo elétrico externo seus elétrons livres se rearranjam formando uma carga superficial de tal forma a anular o campo elétrico no seu interior. Se procedermos da mesma forma, porém, com um material isolante (dielétrico), devido a sua pequena concentração de elétrons livres, o campo elétrico no seu interior não será totalmente anulado. Isto ocorre devido à polarização das moléculas (dipolos elétricos) do material isolante formando também uma carga superficial.

A propriedade que representa a maior ou menor capacidade de um material em permitir um adensamento de um fluxo de campo elétrico por sua estrutura é chamada de permissividade dielétrica e é dada por ε.

A permissividade do ar ou do vácuo é dada por: $\varepsilon_0 = 8{,}8541878176 \times 10^{-12}$ F/m.

Já o termo permissividade relativa do material ε_r é dado por $\varepsilon / \varepsilon_0$ é adimensional e também conhecida como a constante dielétrica k.

A permissividade dielétrica dos materiais depende das condições de trabalho e varia em função da temperatura e da freqüência de utilização.

Material	Permissividade dielétrica (k)
Ar	~1
Mica	5 a 7,8
Vidros	5 a 10
Porcelana	5,1 a 5,5
PVC	2,6 a 6,5
EPR	2,6
Óleo de transformador	2,5
Papel encerado	3,1
Ebonite	2 a 2,8

1.4.4 Rigidez Dielétrica

Corresponde ao valor limite de tensão aplicada sobre a espessura do material (kV/mm), sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante.

No caso do ar, sua rigidez dielétrica vale cerca de 3 x 10^6 N/C, assim, quando um campo elétrico no ar ultrapassar esse valor, ele deixa de ser isolante e torna-se condutor.

O valor da rigidez dielétrica varia de um material para outro e depende de diversos fatores como:

- Temperatura.
- Espessura do dielétrico.
- Tempo de aplicação da diferença de potencial
- Taxa de crescimento da tensão.
- Para um gás, a pressão é fator importante.

Material	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Ar	3
Mica	60
Vidros	7,5 a 30
Porcelana	100
PVC e EPR	50
Óleo mineral	15 a 280

1.5 Propriedades Magnéticas

Força magnética ou magnetismo é fundamental na geração e aproveitamento da corrente elétrica. Equipamentos como transformadores, motores, geradores, medidores mecânicos, instrumentos elétricos etc não existiriam se os fenômenos magnéticos não fossem compreendidos e dominados.

1.5.1 Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética

Os materiais podem exibir, quando submetidos a um campo magnético qualquer, comportamentos diferentes quanto à concentração das linhas de fluxo magnético. Isto é, poderão atrair (concentrar), repelir ou nem mesmo perturbar o campo magnético. Por exemplo, quando colocados próximos ao pólo de um imã certos materiais são:

- Fracamente atraídos (paramagnéticos);
- Fracamente repelidos (diamagnéticos);
- Fortemente atraídos (ferromagnéticos) ou
- Não exercem ação alguma sobre as linhas de fluxo magnético (indiferentes).

A propriedade dos materiais que descreve este comportamento é chamada permeabilidade magnética μ e sua unidade é dada por H/m (H=Henry).

A permeabilidade magnética do vácuo μ_0 é igual a $4\pi \times 10^{-7}$H/m.

De forma análoga à condutividade elétrica dos materiais, o termo permeabilidade relativa do material μ_r é dado por μ / μ_0 e é adimensional.

- Paramagnéticos possuem μ_r ligeiramente maior que 1;
- Diamagnéticos possuem μ_r ligeiramente menor que 1;;
- Ferromagnéticos possuem μ_r muito maior que 1;
- Indiferentes possuem μ_r igual a 1.

A magnetização M de um material representa o grau de polarização dos dipolos magnéticos do material quando o mesmo é atravessado por um campo magnético H

$M = (\mu_r - 1) H = x_m H$ (A/m)

Onde x_m é a susceptibilidade magnética.

Portanto, pode-se dizer que a susceptibilidade e, conseqüentemente, a permeabilidade é a medida da intensidade com que o material pode ser magnetizado. Refere-se à menor ou maior facilidade com que o material se deixa atravessar pelo fluxo magnético circulante.

Material	**Permeabilidade magnética relativa μ_r**
Ar, cobre e madeira	1
Prata	$1 a -20 \times 10^{-6}$
Zinco	$1 a -10 \times 10^{-6}$
Alumínio	$1 a + 22 \times 10^{-6}$
Ferro	5500
Aço	500 a 5000

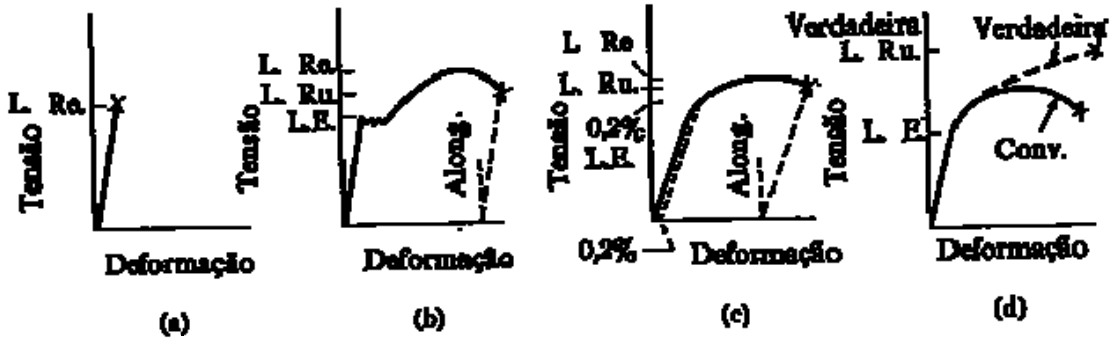
1.6 Propriedades Mecânicas

Para selecionar materiais apropriados e então obter um projeto eficiente, é essencial que se conheçam as propriedades relevantes dos materiais. As propriedades mecânicas dos materiais são medidas em termos do comportamento do material quando sujeito a uma força e são determinadas pelas deformações. Valores numéricos absolutos de algumas propriedades mecânicas não são determinados facilmente, mas são apresentados em comparação a outros materiais.

Muito materiais em serviço estão sujeitos a forças ou carga, por exemplo a liga de alumínio empregada nas asas dos aviões ou o aço no eixo dos automóveis. Em tais situações é necessário projetar o equipamento de tal forma que as deformações em serviço não serão excessivas e fraturas não ocorrerão.

1.6.1 Deformação nos metais

Quando uma tensão (definida como a relação da força aplicada por unidade de área) é aplicada em um material o mesmo sofrerá deformação. Esta deformação pode ser elástica, a qual desaparece quando a tensão é retirada, ou plástica, que é uma deformação permanente. A figura a seguir mostra diagramas tensão x deformação típicos.



Curva tensão x deformação ideal

Conforme a figura, até o ponto L.E. a deformação é proporcional, ou seja, obedece a lei de Hooke, sendo o coeficiente de elasticidade calculado pela razão entre a tensão e a deformação correspondente. O ponto L.E. é o limite de elasticidade ou de escoamento. Em materiais tais como os aços doces, o limite de escoamento é bem definido, quando o material escoa, ou seja, a deformação plástica ocorre sem que, praticamente, haja aumento da tensão. Além, do ponto L.E. a deformação será, em parte, elástica e, em parte, inelástica. Porém, o material não mais retornará às suas dimensões originais quando a força for removida. Após o ponto L.E. o material estica rapidamente e a máxima tensão é aplicada no ponto L.Re. No ponto L.Ru ocorre a fratura.

Cabe ainda ressaltar a diferença de comportamento nas diversas curvas mostradas. Por exemplo, na figura (a) trata-se de um material frágil que se rompe sem que haja deformação plástica. Já na figura (b) temos um material dútil, com limite de escoamento definido. Quando não ocorre escoamento, o L.E. é definido como a tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% (fig. (c)).

- **Tensão**: força por unidade de área;
- **Deformação plástica**: deformação permanente provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade;
- **Deformação elástica**: deformação reversível, proporcional à tensão aplicada;
- **Módulo de elasticidade (módulo de Young):** quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante.
- **Ductilidade**: deformação plástica total até o ponto de ruptura. Pode ser expressa como o alongamento (ver Fig. 1.10) ou como a redução na área da seção reta do corpo, imediatamente antes da ruptura, chamada estricção: No material dútil a região do regime plástico é muito maior que a do regime elástico; o alongamento e estricção são grandes.

$$\text{Estricção} = \frac{\text{área inicial - área final}}{\text{área inicial}}$$

O limite de resistência à tração de um material é calculado dividindo-se a carga máxima suportada pelo mesmo pela área da seção reta inicial. Esse limite, tal como os demais, é expresso em unidades de tensão. Deve-se notar que o limite de resistência é calculado em relação à área inicial. Essa é uma observação importante, particularmente para os materiais dúcteis, pois os mesmo sofrem uma redução de área quando solicitados pela carga máxima. Embora a tensão verdadeira que solicita o material seja calculada considerando-se a

área real, a tensão tal como definida anteriormente é mais importante para o engenheiro, pois os projetos devem ser feitos com base nas dimensões iniciais. Por este motivo também o limite de ruptura pode ser inferior ao limite de resistência.

Outro aspecto importante é que a deformação plástica (permanente) dos metais ocorre pelo deslizamento dos átomos, escorregando uns sobre os outros no cristal. Este deslizamento tende a acontecer preferencialmente ao longo de planos e direções específicos do cristal.

1.6.2 Outras propriedades mecânicas

A **dureza** é definida pela resistência da superfície do material à penetração. Como se pode esperar, a dureza e a resistência à tração estão intimamente relacionadas. A escala Brinell de dureza (BNH) é um índice de medida da dureza, calculado a partir da área de penetração de uma bilha no material. A penetração desta bilha, que é uma esfera de aço duro ou de carbeto de tungstênio, é feita mediante uma força padronizada. A escala Rockwell de dureza, outra das mais comuns escalas de dureza usadas em engenharia, está relacionada ao BNH, mas é medida pela produndidade de penetração de uma pequena bilha padronizada. Muitas escalas Rocwell foram estabelecidas para materiais com diferentes faixas de dureza; estas escalas diferem entre si nas dimensões da bilha e na carga de penetração.

A **tenacidade** é uma medida de energia de deformação: É a energia total necessária para provocar a fratura do corpo de prova. Pode ser representada pela área sob a curva tensão- deformação.

Existem ainda outras propriedades como **resistência à fadiga, ao choque, à fluência**, etc.

As propriedades mecânicas dos materiais são levantadas através de cuidadosos testes de laboratório, sendo imperativo que haja consistência na forma como os testes são conduzidos e os resultados interpretados. Estes requisitos são atendidos através do uso das normas técnicas apropriadas. No caso de aplicações práticas é sempre importante lembrar a natureza das forças a serem aplicadas e sua duração, além da temperatura ambiente.

1.7 Propriedades Térmicas

Inicialmente é importante distinguir claramente a diferença entre calor e temperatura.

Temperatura é um nível de atividade térmica (medida em graus Celsius ou Fahrenheit), enquanto que **calor** é a energia térmica (expresso em calorias ou Btu).

As condições térmicas nas vizinhanças de um material afetam-no de diversas formas, sendo os efeitos mais importantes aqueles que produzem alterações nas microestruturas e portanto nas propriedades dos materiais. Estas alterações em propriedades são por exemplo utilizadas para se obter determinadas características após tratamentos térmicos, a serem discutidos em tópico futuro. As propriedades térmicas mais importantes são o calor específico, a resistência ao calor, a resistência ao frio, a condutividade térmica e a dilatação.

Calor específico médio C_m de um corpo entre dois limites de temperatura θ_0 e θ_1 é a relação entre a quantidade de calor necessário Q para elevar a unidade de massa do corpo da temperatura θ_0 a $\theta 1$ e a elevação de temperatura $(\theta_1 - \theta_0)$, ou seja:

$$Cm = \frac{Q}{(\theta_1 - \theta_0)}$$

A **resistência ao calor** (ao frio) é a capacidade dos materiais e peças suportarem, sem prejuízo de suas propriedades à manutenção por períodos curtos ou longos de altas(baixas) temperaturas. O efeito da temperatura nas propriedades dos materiais será visto com mais detalhes nos capítulos sobre materiais condutores e isolantes.

Se chama de **condutividade térmica** a propagação do calor através dos corpos e tem lugar quando todos os pontos destes não estão a mesma temperatura. O calor se propaga de molécula a molécula, desde os pontos mais quentes aos mais frios. Se considerarmos uma placa de faces paralelas de espessura finita e dimensões transversais infinitas, onde cada face se mantenha a temperatura constante, se produz uma passagem de calor através da massa da placa. Um vez estabelecido o regime permanente, a quantidade de calor que atravessa, durante um tempo muito curto, uma pequena seção paralela às faces depende da temperatura destas e do coeficiente de condutividade térmica da substância que constitui a placa. Este coeficiente expressa o número de calorias-grama que atravessam perpendicularmente, em um segundo, um centímetro quadrado de uma lâmina que tenha um centímetro de espessura e cujas faces se mantenham a temperaturas que difiram de um grau entre si.

Existe uma certa correlação entre condutividade elétrica e térmica, a qual pode explicar-se pela teoria eletrônica da corrente elétrica. Por ação de uma diferença de potencial os elétrons livres, que se movem em todas as direções nos espaços intermoleculares, tomam um movimento de conjunto, que constitui a corrente elétrica. Quando entre dois pontos de um metal existe uma diferença de temperatura, os elétrons das partes mais quentes, que têm maior velocidade média, cedem por choque uma parte de sua energia e de sua velocidade aos elétrons das partes mais frias. A soma de todos estes choques dá lugar, após um tempo mais ou menos longo, à igualação das velocidades médias e, por conseguinte, ao equilíbrio da temperatura. Nos polímeros a transferência de energia é obtida através da vibração e rotação das cadeias de moléculas. Os polímeros são freqüentemente empregado como isolantes térmicos devido a sua baixa condutividade térmica. Assim como nas cerâmicas, a introdução de pequenos poros reduz a condutividade térmica.

Coeficiente de dilatação linear: Quando se aquece um sólido, aumenta em geral suas dimensões em todos os sentidos, aumentando, portanto, sua superfície e seu volume. A dilatação linear se refere ao aumento do comprimento em uma determinada direção. Chamando l_0 ao comprimento inicial e l1 ao comprimento final, correspondentes às temperaturas θ_0 e θ_1, se tem:

$$\alpha = \frac{l_1 - l_0}{lo(\theta_1 - \theta_0)}$$

onde α é o coeficiente médio de dilatação linear entre as temperaturas θ_0 e θ_1. Por não serem iguais os coeficientes de dilatação de todos os materiais, surgem várias dificuldades, entre as quais a soldadura de diferentes corpos.

Dilatação linear: É importante no estudo de linha de transmissão onde o efeito da temperatura na dilatação de cabos aéreos deve ser considerado. Nos casos de união ou junção de materiais diferentes (ex: bimetais que são dois metais com diferentes coeficientes de dilatação térmica soldados por sintetização) este fator é importante para a avaliação da dilatação diferencial (a curvatura sofrida pelo bimetal devido a diferença de dilatação entre os dois metais. A dilatação linear pode ser obtida por:

$$\Delta L = L - L_o = \alpha L_o \Delta T$$

1.8 Propriedades Químicas

1.8.1 Radiação

No campo da engenharia também tem-se preocupado muito com os efeitos das radiações nos materiais. Em particular, os efeitos danosos de radiação devem ser levados em conta no projeto de reatores nucleares, embora não seja somente nesse caso que se tem irradiação de materiais. Sabe-se há muito tempo que os materiais podem ser modificados por radiações. O botânico observa os efeitos da fotossíntese, o fotografo usa esse fato na exposição de seus filmes, o físico utiliza essas interações para aplicações de fluorescência, o médico aplica radiações em terapia. Os efeitos das radiações visíveis (luz) nos materiais é medido através de ensaios padronizados (ASTM).

O principal efeito das radiações nos materiais é originado pela energia extra que ela fornece, que facilita a ruptura de ligações existentes e o rearranjo dos átomos em novas estruturas. Em materiais poliméricos a base de polietileno utilizados em lacres de medidores de energia, a radiação UV, assim como o calor e a umidade, causa degradação.

1.8.2 Oxidação

Logo que se conheceu a estrutura dos átomos verificou-se que, quando um elemento ou uma substância combinava-se com o oxigênio, esta espécie química perdia elétrons.

Modernamente o termo oxidação significa perder elétrons, não necessariamente em presença de oxigênio (quando um elemento perde elétrons o seu estado de oxidação aumenta).

A Oxidação pode ocorrer em três circunstâncias:

1. quando se adiciona oxigênio à substância,
2. quando uma substância perde hidrogênio ou
3. quando a substância perde elétrons.

Exemplos:

As saladas de frutas tendem a se escurecer quando entra em contato com o ar, isso porque o oxigênio age com o ferro presente nas frutas, promovendo sua oxidação. Uma dica para que isso não ocorra é adicionar suco de limão ou laranja, pois a vitamina C - ácido ascórbico - presente nas frutas cítricas impede a ação oxidante do oxigênio sobre a salada.

O manuseio dos fios de cobre causa, além de perdas, sua oxidação diminuindo a vida útil do material.

Aço Corten aplicado na construção de um estúdio para um artista, localizado em New Jersey – EUA. Nas fotos ao lado pode-se perceber o aço antes e depois da oxidação. Este tipo de aço é muito utilizado na construção civil, apresenta em média 3 vezes mais resistência à corrosão que o aço comum além de minimizar os custos com manutenção e o impacto ambiental.

Na foto ao lado pode ser observada a oxidação e a corrosão em uma vela de automóvel. O material dos eletrodos oxidou, e quando a oxidação é pesada a superfície apresenta-se esverdeada.

1.8.3 Corrosão

É a transformação de um material pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição. Este processo resulta em alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal ou uma liga metálica a um meio com presença de moléculas de água, juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor. Porém, a deterioração de materiais não-metálicos, como por exemplo concreto, borracha, polímeros e madeira, devido à ação do meio ambiente, é considerada também, por alguns autores, como corrosão.

A corrosão também pode ser causada por correntes ocasionadas por potenciais externos que produzem casos severos de corrosão, por exemplo, em tubulações enterradas e cabos telefônicos, que estão freqüentemente sujeitos a esses casos devido às correntes elétricas de interferência que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Esse tipo de corrosão é chamada de corrosão por eletrólise ou eletrolítica, e pode-se defini-la como a deterioração da superfície externa de um metal forçado a funcionar como anodo ativo de uma célula ou pilha eletrolítica. Geralmente as áreas corroídas se apresentam livres do produto de corrosão e como é uma forma de corrosão localizada, em pouco tempo ocorre a perfuração das instalações.

São medidas indicadas para se prevenir ou diminuir a ação corrosiva:

- uso de inibidores de corrosão;
- isolamento elétrico dos materiais de nobrezas diferentes: quando for inevitável a existência de grandes diferenças de potencial (por exemplo, chapas de alumínio sobre estruturas de aço, juntas de latão em canalizações de aço, etc), deverá sempre ser especificada a colocação, nos pontos de conexão e arruelas não metálicas como hypalon, neoprene, teflon, etc., que agirão como isolantes;
- aplicação de revestimentos protetores: se for aplicado qualquer revestimento protetor, que alguns poderiam imaginar somente necessário para o metal funcionando como anodo, é recomendável a pintura também do catodo, evitando assim que, caso haja falha no revestimento do anodo, não fique uma pequena área anódica exposta a uma grande área catódica. A única limitação desse método é o comportamento em serviço da camada protetora. Por exemplo, as camadas orgânicas causam problemas, se usadas em temperaturas elevadas ou em condições de abrasão severa; além disso, necessita-se de um recobrimento periódico da superfície em virtude da oxidação da camada com o tempo. Entretanto, as camadas protetoras não precisam ser necessariamente orgânicas. Por exemplo, pode-se usar estanho como uma protetora “inerte” para o aço. Superfícies prateadas, niqueladas ou cobreadas

também são resistentes à corrosão. Essa camada protetora serve como um anodo de sacrifício, que se corrói no lugar do aço. Esses metais podem ser depositados por imersão a quente em banhos metálicos líquidos, ou na forma de placas que podem ser substituídas facilmente. Também se podem usar como camadas protetoras materiais cerâmicos inertes;

- uso de materiais de nobrezas próximas: os metais selecionados, se possível, deverão estar localizados, na tabela de potenciais, o mais próximo possível;
- proteção por passivação. Em uma célula de concentração o oxigênio acentua a corrosão nas regiões onde sua concentração é baixa. Na ausência de diferenças de concentração de oxigênio, outros efeitos podem ser observados. Especificamente,o oxigênio pode reagir com íons e elétrons do anodo formando uma camada protetora. Essa reação é particularmente importante nos aços inoxidáveis (contendo cromo). Um aço contendo cromo é muito resistente à corrosão em condições oxidantes; entretanto, na ausência de oxigênio a reação pode ocorrer.

Em eletro-eletrônicos e computadores em geral a oxidação e a corrosão se iniciam naturalmente em função do acúmulo da umidade e do sal, provenientes do meio-ambiente. Mudanças físicas e químicas na superfície de conexões eletromecânicas, por exemplo, são a causa primária de degradação do desempenho em componentes e equipamentos.

Quando superfícies de contato são expostas à sujeira, fumaça, gases, fuligem e outros sólidos suspensos na atmosfera, "filmes" não metálicos se formam, inibindo a condutividade.

A oxidação é a reação mais comum, e causa a formação do óxido. A maresia corrói a maioria dos metais, formando uma fina camada clorídrica. Umidade, condensação, sais, enxofre e fumaça ácida são também causadores de ferrugem, corrosão e oxidação.

O aumento da resistência e a fricção entre superfícies metálicas também causa ruídos, travamentos e em alguns casos, aumento no consumo de energia.

1.9 Propriedades Ópticas

1.9.1 Refração

Fenômeno que ocorre quando os raios luminosos passam de um meio para outro e sofrem uma variação na velocidade de propagação e uma mudança na direção.

A relação entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz em um material particular (Vp); é chamado de índice de refração “m” daquele material. Para alguns comprimentos de onda (λ), o índice de refração depende mais do material. Então:

Para materiais que não tem a capacidade de absorver luz (não absorventes):

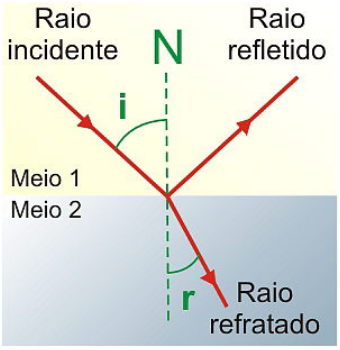
$$m=c/Vp$$

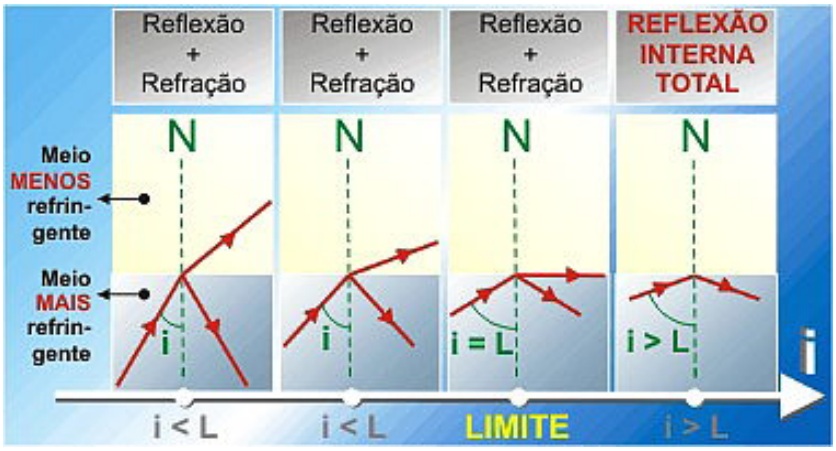
Para materiais que tem capacidade de absorver luz (absorventes):

$$m = m'(1- ai)$$

Onde:
m': índice de refração real
a: relacionado com o coeficiente de absorção do material.
i : $\sqrt{-1}$, parte imaginaria, número complexo

A parte imaginaria do índice de refração é igual a zero para materiais não absorventes.



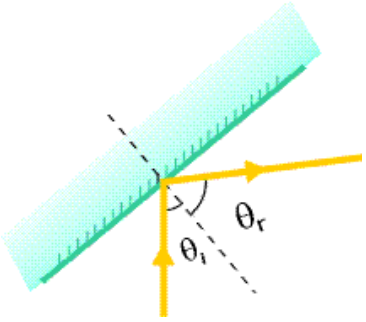


1.9.2 Reflexão

O fenômeno da reflexão consiste na mudança da direção de propagação dos raios luminosos. Consiste no retorno da energia incidente em direção à região de onde ela é oriunda, após entrar em contato com uma superfície refletora.

A energia pode tanto estar manifestada na forma de ondas como transmitida através de partículas. Por isso, a reflexão é um fenômeno que pode se dar por um caráter eletromagnético, óptico ou sonoro.

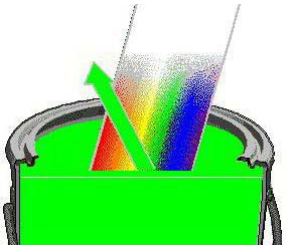
A reflexão pode ser explicada totalmente com base em apenas duas leis, de cunho geral:



1. O raio incidente, a reta normal e o raio refletido são coplanares, ou seja estão no mesmo plano.
2. O ângulo de incidência com a reta normal é igual ao ângulo de reflexão com a reta normal.

Sendo a **normal** a semi-reta que se origina a partir da superfície refletora, situando-se perpendicularmente a esta; **ângulo de incidência** aquele que a direção de deslocamento da energia faz com a normal e **ângulo de reflexão** aquele definido pela direção que a energia que é refletida faz com a normal.

1.9.3 Absorção

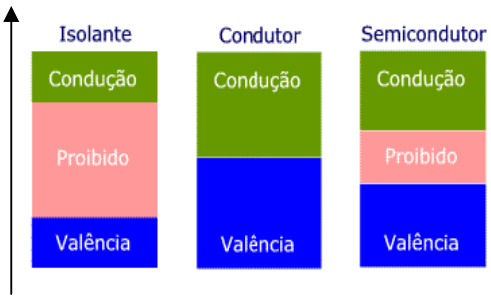


Existem superfícies que absorvem a maior parte das radiações luminosas que chegam até elas. Geralmente, tais objetos são de cor preta. Outros tipos de superfícies e objetos absorvem só uma determinada gama de comprimentos de onda refletindo o resto, o que vai definir a cor da superfície que observamos.

1.10 Bandas de Energia

Quando os átomos não estão isolados, mas juntos em um material sólido, as forças de interação entre eles são significativas. Isso provoca uma alteração nos níveis de energia acima da valência. Podem existir níveis de energia não permitidos, logo acima da valência.

Fornos a arco submerso



Para que um material conduza eletricidade, é necessário que os elétrons de valência, sob ação de um potencial elétrico aplicado, saltem do nível de valência para um nível ou banda de condução.

Conforme figura acima, em um material condutor quase não existem níveis ou banda de energia proibidos entre a condução e a valência e, portanto, a corrente flui facilmente sob a ação do campo elétrico. Um material isolante apresenta uma banda proibida de grande extensão entre a valência e condução. Por isso, dificilmente há condução da corrente.

Os semicondutores possuem bandas proibidas com larguras intermediárias. Isso significa que podem apresentar alguma condução, melhor que a dos isolantes, mas pior que a dos condutores.

1.11 Classificação dos Materiais Elétricos

Os materiais elétricos são, basicamente, classificados sob dois pontos de vista:

a) ***elétrico***, recebendo os nomes de condutores, isolantes e semicondutores;

b) ***magnético***, dividindo-se em: materiais ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.

CAPÍTULO II

MATERIAIS CONDUTORES

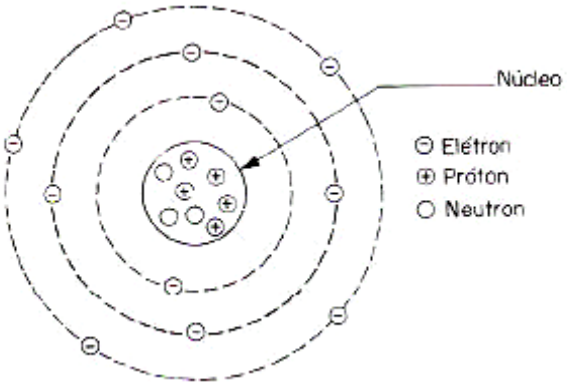
2.1 Introdução

No primeiro capítulo vimos que tanto os íons quanto os elétrons podem ser responsáveis pelo processo de condução de eletricidade, que sempre envolve a noção de movimentação de cargas.

Os materiais condutores são caracterizados por diversas grandezas, dentre as quais se destacam: condutividade ou resistividade elétrica, coeficiente de temperatura, condutividade térmica, potencial de contato, comportamento mecânico, etc. Estas grandezas são importantes na escolha adequada dos materiais, uma vez que das mesmas vai depender se estes são capazes de desempenhar as funções que lhe são atribuídas. A escolha do material condutor mais adequado, nem sempre recai naquele de características elétricas mais vantajosas, mas sim, em outro metal ou uma liga, que, apesar de eletricamente menos vantajoso, satisfaz as demais condições de utilização.

Em um átomo neutro o número de elétrons é igual ao número de prótons. Quando há um desequilíbrio, dizemos que o átomo está ionizado. Se apresentar elétrons em excesso, o átomo estará ionizado negativamente, se apresentar falta de elétrons estará ionizado positivamente.

É importante observar que o número de prótons é constante, o que se altera é o número de elétrons, isto é, para ionizar o átomo negativamente colocamos elétrons a mais, e se quisermos ionizar o átomo positivamente, retiramos elétrons.



Do ponto de vista macroscópico, dizemos que o corpo está eletrizado quando houver um desequilíbrio entre o número de prótons e o número de elétrons dos átomos deste corpo.

A quantidade de carga adquirida pelo corpo depende do número de elétrons retirados ou colocados no corpo.

Em alguns tipos de átomos, especialmente os que compõem os metais - ferro, ouro, platina, cobre, prata e outros -, a última órbita eletrônica perde um elétron com grande facilidade. Por isso seus elétrons recebem o nome de elétrons livres.

Estes elétrons livres se desgarram das últimas órbitas eletrônicas e ficam vagando de átomo para átomo, sem direção definida. Mas os átomos que perdem elétrons também os readquirem com facilidade dos átomos vizinhos, para voltar a perdê-los momentos depois. No interior dos metais os elétrons livres vagueiam por entre os átomos, em todos os sentidos.

A condução do fluxo de elétrons livres, ou a circulação de uma corrente elétrica é notada tanto em materiais sólidos quanto nos líquidos, e, sob condições favoráveis, também nos gasosos.

Sob o ponto de vista prático, a maioria dos materiais condutores é de sólidos, e dentro desse grupo, ressaltam-se, os metais que, devido à facilidade de fornecer elétrons livres, são usados para fabricar os fios de cabos e aparelhos elétricos.

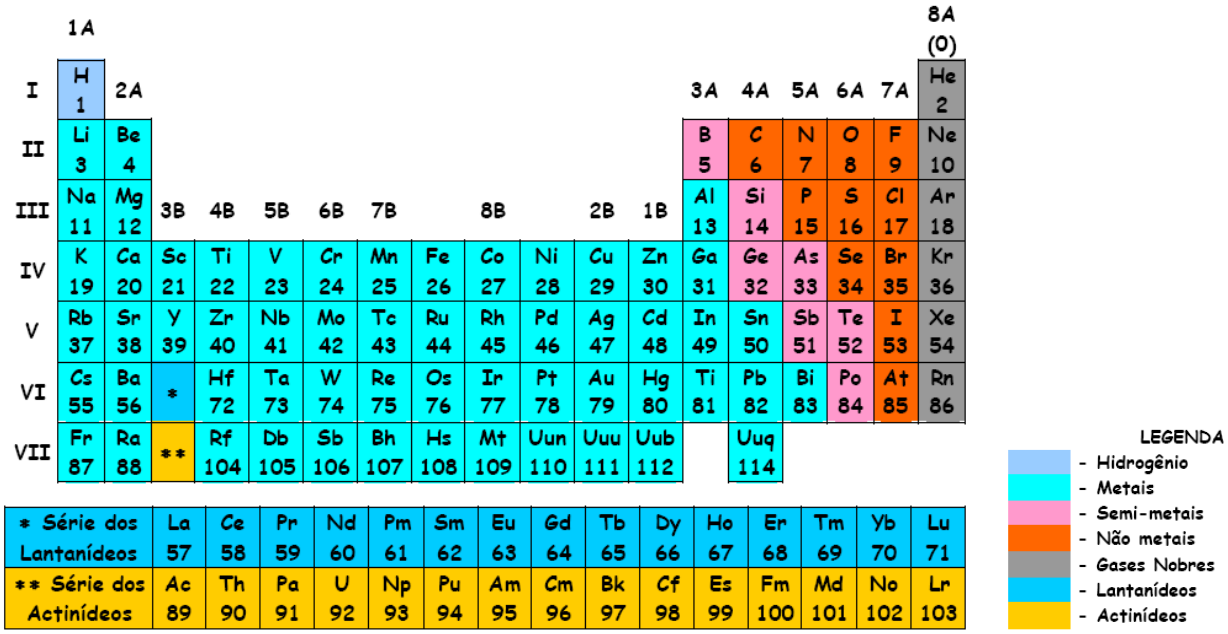
No grupo dos líquidos, vale mencionar os metais em estados de fusão, eletrólitos e as soluções de ácidos, de bases e de sais. Destaca-se o caso particular do mercúrio, único metal

que, à temperatura ambiente, se encontra no estado líquido e solidifica-se apenas a –39 ºC. Outro exemplo: em uma solução de água com sal (NaCl), haverá uma dissociação da molécula de cloreto de sódio (NaCl) em íons Na^+ e Cl^-, que ficam livres para se movimentar pelo interior da solução.

Quanto aos gasosos, estes adquirem características condutoras sob a ação de campos muito intensos, quando então se podem ionizar. É o caso das descargas através de meios gasosos, como na abertura arco com a formação de um meio condutor conhecido por plasma, e tanto, normalmente, os gases, mesmo os de origem metálica, não podem ser utilizados nem considerados como condutores.

Exemplos de bons condutores:

- Metais (como o cobre, alumínio, ferro, etc.) usados para enrolamentos de máquinas elétricas e transformadores, etc.
- Ligas metálicas usadas para fabricação de resistências, aparelhos de calefação, filamentos para lâmpadas incandescentes, etc.
- Grafite
- Soluções aquosas (de sulfato de cobre, de ácido sulfúrico. etc.)
- Água da torneira, água salgada, água ionizada (como, por exemplo, as das piscinas);
- Corpo humano;
- Ar úmido.



2.2 Características dos Condutores

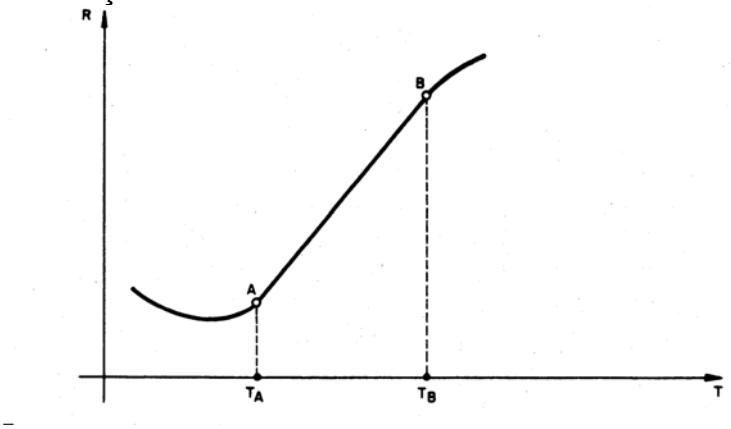
2.2.1 Variação da resistividade com a temperatura e a freqüência

A resistência elétrica de uma dada peça de determinado material (unidade: W) é dada pela equação a seguir:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

onde:
ρ - resistividade elétrica do material (W.cm)
A - seção transversal (em cm^2)
l - comprimento do condutor (em cm)

Quando a temperatura em um material condutor é aumentada, as partículas vibram interferindo nos movimentos dos elétrons. Uma tal influência causa perdas nos deslocamentos dos elétrons e, conseqüentemente, aquecimento do corpo condutor. Traçando-se a curva característica temperatura-resistência, indicada na Figura a seguir, nota-se que ela não obedece em toda sua extensão a uma relação constante de ordenadas e abscissas.



De interesse prático é o setor reto da característica (trecho AB), cuja inclinação é dada por:

$$tg\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

A relação tgα/R é o chamado coeficiente de temperatura da resistência e indicado por αT_1. Normalmente a temperatura inicial, que serve de referência, é tomada como $T_1 = 20^oC$.

Nesse caso:

$$R_{T1} = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_2 - 20)]$$

A condutividade térmica de metais e ligas também é de extrema importância, pois ela demonstra a capacidade do material de liberar para o ambiente o aquecimento causado pelas perdas.

A distribuição uniforme de corrente através da seção de um condutor existe apenas para a corrente contínua. Com o aumento da freqüência acontece uma distribuição não-uniforme de corrente, fenômeno este chamado de “efeito pelicular”, pois em um condutor circular a densidade de corrente geralmente aumenta do interior em direção a superfície.

2.2.2 Resistência de contato nos metais

Quando se aplica uma peça metálica sobre outra, com objetivo de contato elétrico, estas ficam na verdade separadas, qualquer que seja a pressão a que sejam submetidas, por uma distância relativamente grande, se comparada às dimensões do átomo.

Na verdade existem alguns pontos de contato perfeito e o resto dos pontos a distância da ordem de mm, de onde se entende a existência da resistência de contato.

A passagem de energia de uma peça a outra se dá por dois modos:

- através de uma zona de contato íntimo, ou de condução;
- através de uma zona de disrupção, onde o gradiente de potencial pode alcançar valores elevados, muito pouco inferiores a rigidez dielétrica do ar.

A partir do momento em que se apresentam ao mesmo tempo fenômenos condutores e disruptivos nos contatos, não é possível aplicar a estes a lei de Ohm. Chama-se de "resistência de contato", no entanto, a relação entre a tensão nos bornes de um contato e a intensidade de corrente que o atravessa.

Esta resistência não é constante e depende da pressão a que estão submetidas as peças (pressão de contato), da composição destas, da sua forma, da sua seção, do sentido e intensidade da corrente, etc.

A prata, o cobre, o bronze, o latão e o tungstênio dão bons contatos, a resistência dos contatos de alumínio, entretanto, é muito elevada. O contato em corrente contínua apresenta uma resistência independente da intensidade de corrente.

Pode-se considerar bom um contato quando resulta muito pequena a diferença de temperatura entre o mesmo e os pontos ao redor. No caso de contato entre metais, deve-se ficar atento a formação de pares galvânicos (em presença de um líquido condutor ou simplesmente da umidade).

2.3 Materiais de elevada condutividade

Os materiais condutores caracterizam-se por uma elevada condutividade elétrica. Possuem também grande capacidade de deformação, moldagem e condutividade térmica. Com exceção do mercúrio e dos eletrólitos, que são condutores líquidos, e do plasma (gás ionizado) que é gasoso, os materiais condutores são geralmente sólidos e, neste caso, incluem-se os metais, suas ligas e não-metais como o carvão, carbono e grafite.

Os metais são elementos químicos que formam sólidos opacos, lustrosos, bons condutores de eletricidade e de calor e, quando polidos, bons refletores de luz. A maioria dos metais é forte, dúctil, maleável e, em geral, de alta densidade. Vejamos alguns dos metais mais utilizados na área de Engenharia Elétrica:

2.3.1 Cobre e suas Ligas

O cobre apresenta as vantagens a seguir, que lhe garantem posição de destaque entre os metais condutores.

- Pequena resistividade. Somente a prata tem valor inferior, porém o seu elevado preço não permite seu uso em quantidades grandes;
- Características mecânicas favoráveis;

- Baixa oxidação para a maioria das aplicações. O cobre oxida bem mais lentamente, perante elevada umidade, que diversos outros metais; esta oxidação, entretanto, é bastante rápida quando o metal sofre elevação de temperatura;
- Fácil deformação a frio e a quente: é relativamente fácil reduzir a seção transversal do cobre, mesmo para fios com frações de milímetros de diâmetro.

O cobre tem cor avermelhada característica, o que o distingue de outros metais, que, com exceção do ouro, são geralmente cinzentos, com diversas tonalidades.

O valor da condutividade informa sobre o grau de pureza do cobre. A máxima pureza é encontrada no cobre obtido em ambiente sem oxigênio, quando se aproxima da condutividade do cobre eletrolítico. Destaque-se então que a condutividade elétrica do cobre é muito influenciada na presença de impurezas, mesmo em pequenas quantidades.

A resistividade do cobre a 20^{o}C é de: ρ_{cu} = 1,7241μΩcm^2/cm e seu coeficiente de termo-resistividade vale: α = 0.00393/ºC.

O cobre resiste bem à ação da água, de fumaças, sulfatos, carbonatos, sendo atacado pelo oxigênio do ar, e em presença deste, ácidos, sais e amoníaco podem corroer o cobre.

O cobre é obtido em forma eletrolítica, fundido e transformado em lingotes. Na transformação subseqüente aos perfis e peças desejadas, quando não se usa a fusão e sim uma transformação mecânica por laminação e estiramento, efetua-se primeiramente um aquecimento do lingote para facilitar a transformação bruta, até temperaturas de 920-980^{o}C.

Na laminação a frio, o cobre se torna mais duro e elástico, e reduz sua condutividade. É o estado de cobre encruado. Essa modificação de características pode representar um empecilho ao uso do metal e, nesse caso, se faz o seu recozimento a uma temperatura de 500-560^{o}C.

Aplicações do Cobre:

Em função de suas propriedades, o cobre, nas suas diversas formas puras, tem determinadas suas aplicações. O cobre encruado ou duro é usado nos casos em que se exige elevada dureza, resistência à tração e pequeno desgaste, como no caso de redes aéreas de cabo nu em tração elétrica, particularmente, para fios telefônicos, para peças de contato e para anéis coletores. Em todos os demais casos, principalmente em enrolamentos, barramentos e cabos isolados, se usa o cobre mole ou recozido. Casos intermediários precisam ser devidamente especificados. Em muitos casos, porém, o cobre não pode ser usado na forma pura, quando então as ligas de cobre passam a ser encontradas. Essas ligas são feitas com metais escolhidos de modo a compensar ou melhorar alguma das propriedades do cobre, cabendo destacar, porém, que, geralmente, assim procedendo, estamos prejudicando outras propriedades.

Ligas de Cobre:

A escolha de uma liga deve considerar também os aspectos econômicos. A adição de certos elementos (por exemplo, o níquel e o estanho) pode aumentar o preço da liga, aumentando certas propriedades, ao passo que, a presença de outros elementos (zinco, chumbo) permite abaixar o preço sem redução notável de características técnicas. A tabela abaixo apresenta as características das Ligas de Cobre.

Liga	*Tratamentos*	*Condutividade, em relação ao cobre (%)*	*Resistência à tração, em* kg/mm²	*Alongamentos, (%)*
Cu + Cd	recozido	95	até 31	50
(0,9 Cd)	encruado	83–90	até 73	4
Bronze	recozido	55–60	29	55
0,8 Cd + + 0,6 Sn Cu > 60%	encruado	50–55	até 73	4
Bronze	recozido	15–18	37	45
2,5 Al + 2 Sn	encruado	15–18	até 97	4
Bronze	recozido	10–15	40	60
fosforoso 7Sn + 1P	encruado	10–15	105	3
Latão	recozido	25	32–35	60–70
30 Zn	encruado	25	até 88	5
Bronze BI 0,1% Mn, o resto Cu	–	82	50–52	–
BII 0,8 Mn ou 1% Sn + + 1 Cd	–	60	56–58	–
BIII 2,4% Sn ou 1,2 Sn + + 1,2 Zn	–	31	66–74	–

Um exemplo de liga de cobre são os bronzes. As ligas de cobre e estanho podem suportar adições mais ou menos importantes de chumbo, de zinco e as vezes de níquel. O bronze apresenta a característica de ser resistente ao desgaste por atrito, fácil usinagem e são ligas elásticas. Suas aplicações principais são em rolamentos, partes de máquinas, engrenagens, trilhos de contato, molas condutoras, fios finos e peças fundidas. As propriedades variam de acordo com o percentual de estanho.

Já os latões tradicionais são ligas de cobre e zinco, às quais se adiciona um pouco de chumbo ou alumínio. Em princípio o uso de latões comuns não é aconselhável quando existirem problemas de corrosão. Porém este não é o mesmo caso quando são empregados latões de alta resistência (55-70% Cu, 20-35% Zn + Al, Mn, Fe, Ni, Sn, etc.), os quais são possuidores de excelentes propriedades mecânicas e de notável resistência à corrosão em determinados ambientes.

Outras ligas de cobre seriam: cobre alumínio (8 a 12% de alumínio) que têm propriedades comparáveis àquelas dos aços inoxidáveis, além da possibilidade de poderem ser obtidas mais facilmente, por fundição em areia ou em moldes metálicos; ligas cobre-cromo,etc.

2.3.2 Alumínio e suas Ligas

No global de suas propriedades, o alumínio é o segundo metal mais usado na eletricidade, havendo nos últimos anos uma preocupação permanente em substituir mais e mais as aplicações do cobre pelo alumínio, por motivos econômicos.

Alguns aspectos, baseados principalmente no custo (mesmo levando em conta compensações no dimensionamento das partes condutoras) e produção nacional maior do alumínio, têm levado a crescente preferência pelo alumínio, cujo maior problema é a sua fragilidade mecânica e sua rápida, porém não profunda, oxidação.

Vejamos uma comparação de algumas características entre o cobre e o alumínio na tabela apresentada na seqüência.

Característica física	*Alumínio (duro)*	*Cobre (duro)*	*Padrão IACS**
Densidade a 20 °C (g/cm³)	2,70	8,89	8,89
Condutividade mínima porcentual a 20 °C	61	97	100
Resistividade máxima a 20 °C (Ωmm²/m)	0,0282	0,0177	0,0172
Relação entre os pesos de condutores de igual resistência em corrente contínua e igual comprimento	0,48	1,03	1,00
Coeficiente de variação da resistência por °C a 20 °C	0,0040	0,0038	0,0039
Calor específico (cal/g °C)	0,214	0,092	0,092
Condutividade térmica (cal/cm³.s. °C)	0,48	0,93	0,93
Módulo de elasticidade do fio sólido (kgf/mm²)	7.000	12.000	–
Coeficiente de dilatação linear/°C	23×10^{-6}	17×10^{-6}	17×10^{-6}

* Padrão IACS: Padrão Internacional do cobre recosido, tomado como referência de 100% de condutividade.

Mesmo considerando a necessidade de condutores de alumínio com diâmetro maior que seria necessário se o material fosse cobre, o fio de alumínio ainda tem aproximadamente a metade do peso do de alumínio, o que reduz o custo dos elementos de sustentação envolvidos, dado importante na construção de linhas de transmissão. O uso do alumínio adquiriu por essas razões importância especial nas instalações elétricas em aviões.

Outro aspecto é o comportamento oxidante, já mencionado. O alumínio apresenta uma oxidação extremamente rápida, formando uma fina película de óxido de alumínio que tem a propriedade de evitar que a oxidação se amplie. Entretanto, esta película apresenta uma resistência elétrica elevada com uma tensão de ruptura de 100 a 300V, o que dificulta a soldagem do alumínio, que por essa razão exige pastas especiais.

A corrosão galvânica é uma situação particular, própria entre metais afastados na série galvânica dos elementos. Devido ao grande afastamento e à conseqüente elevada diferença de potencial entre o cobre o alumínio, essa corrosão se apresenta sempre que o contato entre Cu e Al ocorre num ambiente úmido. Por essa razão, os pontos de contato Al-Cu precisam ser isolados contra a influência do ambiente.

Aplicações das Ligas do Alumínio:

O alumínio puro apenas é usado nos casos em que as solicitações mecânicas são pequenas. Tal fato ocorre, por exemplo, nos cabos isolados e em capacitores. Entretanto, é bastante grande o número de ligas de alumínio usadas eletricamente, nas quais este é associado principalmente a Cu, Mg, Mn e Si, que , com exceção do silício, formam sistemas cristalinos mistos, sensivelmente dependentes das condições de temperatura em que a liga é processada. Alguns exemplos de ligas de alumínio, assim como suas características, são apresentados na Tabela a seguir:

Composição	Tipo	Resist. tração (kg/mm²)	Dureza Brinell (kg/mm²)	Condut. elétrica (Ωmm²/m)	Coeficiente de temperatura α_T(1/°C)	Características
AlCuMg Dura-lumínio	ligas normais: mole	< 25	< 60	28	$3{,}5 \times 10^{-3}$	para construção de peças; sofrem corrosão
	encruado	40	100	20	$2{,}1 \times 10^{-3}$	
	ligas com elevada resistência: encruado	40	110	–	–	
	encruado e laminado a frio	30 ... 50	120	–	–	
Al Mg Si	mole.	8	35	30	$3{,}5 \times 10^{-3}$	resistência mecânica média, boa deformabilidade
	duro.	16	55	26	$3{,}5 \times 10^{-3}$	
	laminado a frio.	10	60	27	$2{,}8 \times 10^{-3}$	boa estabilidade química
	laminado a quente	20	80	27	$2{,}8 \times 10^{-3}$	
Al Mg Si (Aldrey)	mole	10	30	30	$3{,}6 \times 10^{-3}$	usado em cabos
	encruado	30	80	33	$3{,}6 \times 10^{-3}$	
Al Mg (valores médios)	mole	22	55	20	$2{,}4 \times 10^{-3}$	estável contra água do mar não suporta soluções alcalínas. Quanto maior % Mg maior dificuldade para soldagem
	meio mole	28	70	17	$2{,}1 \times 10^{-3}$	
	duro	30	90	15	$1{,}8 \times 10^{-3}$	
Al Mn	mole	7	20	25	$2{,}7 \times 10^{-3}$	Melhor estabilidade que Al, boa capacidade de soldagem
	meio mole	12	30	24	$2{,}7 \times 10^{-3}$	
	duro	15	40	23	$2{,}7 \times 10^{-3}$	
Al Mg Mn	mole	15	40	23	$2{,}4 \times 10^{-3}$	Estabilidade média perante sais e ácidos.
	meio mole	20	50	22	$2{,}4 \times 10^{-3}$	
	duro	25	60	21	$2{,}4 \times 10^{-3}$	

O pequeno peso específico das ligas de alumínio leva, na área eletrotécnica, às seguintes aplicações principais:

- em equipamento portátil, uma redução de peso;
- em partes de equipamento elétrico em movimento, redução de massa, da energia cinética e do desgaste por atrito;

- de peças sujeitas a transporte, maior facilidade nesse transporte, extensiva à montagem dos mesmos;
- em estruturas de suporte de materiais elétricos (cabos, por exemplo) redução do peso e conseqüente estrutura mais leve;
- em locais de elevada corrosão, o uso particular de ligas com manganês

2.3.3 Chumbo (Pb)

O chumbo é um metal de coloração cinzenta, com um brilho metálico intenso quando não oxidado. Sua oxidação superficial é, porém bastante rápida.

Apresenta elevada resistência contra a ação da água potável, devido à presença de carbonato de chumbo, sal, ácido sulfúrico. Não resiste a vinagre, materiais orgânicos em apodrecimento e cal. O chumbo é atacado pela água destilada. O chumbo é venenoso. Permite sua soldagem.

Nas aplicações elétricas, é freqüentemente encontrado, reduzido a finas chapas ou folhas, como nas blindagens de cabos com isolamento de papel, acumuladores de chumbo-ácido e paredes protetoras contra a ação de raios X. Ainda o chumbo é encontrado em elos fusíveis e em material de solda. Nas ligas, o chumbo é encontrado junto com antimônio, telúrio, cádmio, cobre e estanho, adquirindo assim elevada resistência mecânica e à vibração, ficando, porém prejudicada a resistência a corrosão.

Uma das ligas mais freqüentemente encontradas é a do chumbo com antimônio, onde o antimônio eleva a dureza. Já 1,5% de Sb duplicam esse valor. Suas aplicações mais comuns, além das já citadas, são na indústria química e de papel, nas tubulações de águas salinas, mancais anti-fricção, projéteis de armas, usinas de energia nuclear e elemento-liga de latões, bronzes e aços (para melhorar a usinabilidade).

2.3.4 Estanho (Sn)

O metal é branco prateado, mole, porém mais duro que o chumbo. Nota-se que a resistividade do estanho é elevada, o que faz esperar um elevado aquecimento perante a passagem de corrente.

Utilizado em temperaturas inferiores a 18^{o} C, o metal apresenta manchas cinzentas, que desaparecem se o metal é novamente aquecido. Ao contrário, se aquecido acima de 160 ºC, o material se torna quebradiço e se decompõe na forma de pequenos cristais.

À temperatura ambiente normal, o estanho não se oxida, a água não o ataca e ácidos diluídos o atacam apenas lentamente. Por isso o estanho é usado para revestimento e está presente em ligas, como no bronze.

A exemplo do chumbo, o estanho é encontrado como material de solda. Em algumas aplicações é reduzido a finas folhas. O minério de estanho já está se tornando bastante raro. Suas características físicas vêm indicadas na Tabela a seguir.

Metal	*Resistência à tração* (kgf/mm²)	*Alongamentos* %	*Peso específico* a 20 °C (g/cm³)	*Temperatura de fusão* (°C)	*Temperatura de evaporação* (°C)	*Coeficiente de temperatura da resistência* α_T a 20 °C (1/°C) × 10^{-3}	*Resistividade a* 20 °C (Ωmm²/m)
Cobre	fundido – 15 a 20	35 – 40	8,3 a 8,9	1083	2360	3,82 – 4,30	0,0169
	laminado e recosido – 20 a 26	35 – 40					0,0179
	encruado – 35 a 45	2 – 6					0,0182
Alumínio	recosido – 3,5 – 6	40 – 50	2,7	658	2270	4,20 a 4,30	0,0262
	encruado – 11 – 13	4 a 5					0,0295
Chumbo	1,6	55	11,4	327	1560	4,10	0,20 a 0,22
Estanho	1,5 – 4,0	–	7,3 a 7,8	232	2360	4,40	0,114
Prata	16 – 30	50	10,5	960	1918	3,60 a 4,00	0,0162
Ouro	27	–	19,3	1063	2700	3,70	0,021 – 0,024
Platina	20 – 40	3 – 45	21,4	1773	4300	30,7	0,10
Mercúrio	–	–	13,55	solidif. – 39	357	0,9	0,95 – 0,96
Zinco	3 – 36	0,5 a 50	7,14	419	900	3,5 a 4,7	0,06
Cádmio	6	–	8,6	321	767	–	–
Níquel	40 – 45	25 a 30	8,9	1450	3147	5 a 6	0,07 – 0,09
Cromo	–	100 – 10^{-7}	7,2	1920	2660	–	0,7 – 0,8
Tungstênio	400	1 – 4	19 – 20	3400	5000 – 6000	5,2	0,05 – 0,06
Mobidênio	180 – 200	2 – 5	10,2	2630	3600	4,8	0,0477

2.3.5 Prata (Ag)

É o metal nobre de maior uso industrial, notadamente nas peças de contato. A cor prateada brilhante é característica, escurecendo-se devido ao óxido de prata ou sulfito de prata que se forma em contato com o ar. Sua obtenção resulta freqüentemente de minérios combinados de prata, cobre e chumbo.

A prata, devido às suas características elétricas, químicas e mecânicas, cujos valores numéricos estão indicados na Tab. anterior, é usada em forma pura ou de liga, cada vez mais em partes condutoras onde uma oxidação ou sulfatação viria criar problemas mais sérios. É o caso de peças de contato, notadamente nas parte em que se dá o contato mecânico entre duas peças e, onde, além de um bom material condutor, é conveniente ter-se um metal que não influa negativamente devido a transformações metálicas. No caso da prata, no seu estado puro, encontra o seu uso nas pastilhas de contato, para correntes relativamente baixas; quando essa solução não é adequada, usam-se pastilhas de liga de prata, onde o Ag é misturado com níquel e cobalto, paládio, bromo e tungstênio.

A prateação, numa espessura de alguns micrometros, é usada para proteger peças de metal mais corrosível. Um comportamento especial da prata, em peças de contato, é a eliminação automática de óxidos de prata, por decomposição em prata pura e liberação do oxigênio, à temperatura de 200 a 300 °C.

Na limpeza de contatos de prata, não usar material abrasivo (lixas, limas, etc).

2.3.6 Ouro (Au)

Esse metal, que apresenta uma condutividade elétrica bastante boa, destaca-se pela sua estabilidade química e pela conseqüente resistência a oxidação, sulfatação, etc. Também

suas características mecânicas são adequadas para uma série de aplicações elétricas, havendo porém a natural limitação devido ao seu preço.

O ouro é encontrado eletricamente em peças de contato na área de correntes muito baixas, casos em que qualquer oxidação poderia levar à interrupção elétrica do circuito. E o caso de peças de contato em telecomunicações e eletrônica. Seu uso nesse caso é feito na forma pura, não sendo encontrado em forma de liga, pois esta somente eliminaria as propriedades vantajosas que o ouro apresenta. Consulte suas características na tabela anterior.

2.3.7 Platina (Pt)

Ainda na família dos metais nobres, encontramos a platina, que também é bastante estável quimicamente. É relativamente mole, o que permite uma deformação mecânica fácil, bem como sua redução a folhas, com espessuras de até 0,0025mm, ou a fios finos, com diâmetro de até 0,015mm ou ainda menores através de processos especiais.

Devido às suas propriedades antioxidantes o seu uso elétrico é encontrado particularmente em peças de contato, anodos, fios de aquecimento. É o metal mais adequado para a fabricação de termoelementos e termômetros resistivos até 1000oC, pois até essas temperaturas não sofre transformações estruturais, fazendo com que a resistividade varie na mesma proporção da temperatura.

Termômetros resistivos são particularmente usados perante pequena variação de temperatura, casos não mais registrados por termoelementos. Sua única desvantagem é de apresentarem uma certa dilatação, o que dificulta a leitura de temperaturas em dado ponto. Na faixa de - 200 a + 500^{o}C, a platina permite a leitura mais exata da temperatura do que outros metais.

2.3.8 Mercúrio (Hg)

É o único metal líquido, à temperatura ambiente. Aquecido, oxida-se rapidamente em contato com o ar. É usado em termômetros resistivos para leituras entre 0 e 100oC, bem como para chaves basculantes usadas conjuntamente com sistemas mecânicos, sobretudo de relógios, em retificadores, lâmpadas (vapor de mercúrio). Quase todos os metais (com exceção do ferro e do tungstênio) se dissolvem no mercúrio. Os vapores de mercúrio são venenosos. Na área dos retificadores, seu uso caiu acentuadamente com a evolução do retificador de silício.

2.3.9 Zinco (Zn)

É um metal branco-azulado, que tem o maior coeficiente de dilatação entre os metais. É quebradiço à temperatura ambiente, estado que muda entre 100-150oC, quando se torna mole e maleável, o que permite sua redução a finas chapas e fios. Acima de 200oC, volta a ser quebradiço, podendo ser reduzido a pó a 250oC.

A resistência à tração varia entre limites amplos, em função do processo usado na fabricação das peças. O valor mais baixo se aplica a peças fundidas; quando se aplica um processo de laminação, o valor se eleva em aproximadamente 10 a 12 vezes. Da mesma maneira se eleva o alongamento, porém num proporção diferente, bem maior.

O zinco é estável quimicamente no ar, após se recobrir com uma fina película de óxido ou carbonato de zinco. É atacado rapidamente por ácidos e bases.

Em contato com outros metais e na presença de umidade, existe facilidade de formação de elementos galvânicos, que corroem ou dissolvem o zinco. O metal que menos corroe o zinco é o aço, o qual pode, assim, ser usado para recobrimento e proteção do zinco. O zinco é ainda usado para revestimento - a zincagem - através de zincagem a fogo (imersão em estado de fusão), aplicação por pulverização, ou zincagem eletrolítica.

Ligas de zinco - resultam sobretudo da união de zinco com aluminio e cobre, a fim de elevar sua resistência à tração e demais propriedades mecânicas. Ligas cristalinas Zn-Al-Cu levam a cristais mistos, que se transformam com o tempo, conseqüentemente apresentam o chamado envelhecimento, que se faz notar inclusive por uma elevação do volume, com conseqüente redução das características mecânicas do alongamento, etc. Acrescentam-se ainda corrosões intercristalinas pela ação da umidade e do calor. Nesse sentido, destaca-se a ação do alumínio, de modo negativo. Caso tal comportamento comprometa a peça, deve-se acrescentar magnésio e lítio, que reduzem o efeito corrosivo. O combate ao envelhecimento é obtido, de um lado, usando-se zinco com pureza 99,99%, e do outro, pelo acréscimo de pequena quantidade de magnésio (0,1%).

As ligas de Al-Zn não apresentam envelhecimento, além de se destacarem por uma dilatação mínima. Para a fusão sobre pressão, as ligas com 4% de Al, 0,6% de Cu, 0,05% de Mg e o resto de zinco, têm apresentados os melhores resultados.

Nas aplicações elétricas, o zinco predominante usado tem pureza 99,99%, em forma de liga com 0,9% de Al, 0,5% de Cu, com uma condutividade elétrica de 16 a 17m/□mm2 e uma resistência à tração de 18 a 20 kgf/mm^2 perante um alongamento de 40-55%. Essa liga é de fácil soldagem. Comparado com o cobre, a seção transversal de tais fios deve ser 3,3 vezes maior. A diferença entre os coeficientes de dilatação dessa liga e do material dos conetores, pode fazer com que o contato se solte, depois da passagem da corrente.

Uma eventual camada de óxido de zinco é bem mais mole e, por isso, de remoção mais fácil que a do cobre. O uso do zinco com metal condutor é limitado a elementos galvânicos (pilha de Leclanché) e a certos elementos de ligação em forma de fios e contatos.

2.3.10 Cádmio (Cd)

O cádmio é um acompanhante constante dos minérios de zinco e assim se constitui num subproduto do mesmo. O cádmio é mais mole que o zinco, porém no mais suas propriedades são bem semelhantes a este. Por seu brilho metálico, tem sido usado como metal de recobrimento, na proteção contra a oxidação. Por ser mais caro que o zinco essa aplicação de cádmio hoje é quase que totalmente substituída pela zincagem. Assim o seu uso fica condicionado à fabricação das baterias de Ni-Cd. O cádmio é venenoso.

2.3.11 Níquel (Ni)

É um metal cinzento claro, com propriedades ferromagnéticas. Puro, é usado em forma gasosa em tubos e para revestimentos de metais de fácil oxidação. É resistente a sais, gases, materiais orgânicos sendo porém sensível à ação do enxofre. Aquecido ao ar, não reage

com o mesmo até 500oC. Assim, seu uso está difundido na indústria química, particularmente em aplicações sobre o ferro, pois ambos têm o mesmo coeficiente de dilatação e temperatura de fusão.

A deformação a quente é processada a 1100oC, devido à sua elevada dureza. Freqüentemente, porém, essa deformação é feita a frio, permitindo obter fios de até 0,03mm de diâmetro. O niquel se caracteriza ainda por uma elevada estabilidade de suas propriedades mecânicas, mesmo a temperaturas bem baixas. Magneticamente, o níquel pode ser magnetizado fracamente, não sendo mais magnético acima de 356oC (temperatura de Curie).

Seu uso resulta assim para fios de eletrodos, anodos, grades, parafusos, etc. É de difícil evaporação no vácuo. A emissão de elétrons é elevada pelo acréscimo de cobre até 3,5%. Fios de níquel podem ser soldados a outros de cobre sem problemas. Nas lâmpadas incandescentes, fios de níquel são usados como alimentadores do filamento de tungstênio (W) devido ao seu comportamento térmico. O seu elevado coeficiente de temperatura o recomenda para termômetros resistivos. Encontramos seu uso nos acumuladores de Ni-Cd e nas ligas de Ag-Ni para contatos elétricos. Aliás, todas as ligas de níquel se identificam por serem resistentes, mecanicamente, e contra a corrosão e por suportarem bem o calor. Sua presença em ligas Ni-Cu já altera a cor típica do cobre, tornando-se praticamente igual à prata com 40% de Ni. A condutividade elétrica do cobre cai rapidamente na presença do níquel, chegando ao seu valor mínimo a 50% de Ni. Assim, ligas de níquel são adequadas na fabricação de resistores, a exemplo do Konstantan. Monel, e outros. A liga Ni - Cr (ou nicrom), eventualmente com pequenos acréscimos de ferro manganês, suporta bem, em particular, o calor, reduzindo a possibilidade de oxidação do níquel, sobretudo acima dos 900oC. Outro setor onde o níquel é usado é o dos termoelementos, em substituição ao par platina - platina-sódio, para temperaturas até 1200oC. Combinado com o ferro, leva a liga magnéticas apropriadas.

2.3.12 Cromo (Cr)

É um metal de brilho prateado-azulado, extremamente duro. O cromo não se modifica em contato com ar, e permite bom polimento. Possui elevado coeficiente de reflexão (65%). Somente sofre oxidação a temperaturas superiores a 500oC, sendo mais sensível à ação de enxofre e de sais. Quando imerso de uma solução salina, se recobre com uma camada de óxido que o protege contra outros ataques. O cromo é por isso usado para proteger outros metais que oxidam com maior facilidade. Aliando sua baixa oxidação à elevada estabilidade térmica e à alta resistividade elétrica, resulta ampla utilização do cromo na fabricação de fios resistivos, em forma pura ou como liga.

2.3.13 Tungstênio (W)

O tungstênio é obtido por um processamento quimicamente complexo, na forma de pó, e comprimido em barras a pressões de 2000 atm. Por ser um metal com temperaturas-limite muito elevadas, todo seu processo de manufatura e obtenção de produtos elétricos é extremamente difícil e de custo elevado. A própria compactação dos grãos do pó é complexa, resultando pequena aderência entre cristais e, assim, peças quebradiças.

Modificando-se, porém a disposição cristalina, através de um processo especial, fazendo com que passem a uma disposição linear, podem ser fabricados fios ou filamentos cuja resistência à tração se eleva com redução do diâmetro, de 5 a 7 vezes.

Uma vez que o tungstênio não permite corte, usinagens ou furação convencionais, devido a sua dureza e ao fato já mencionado de ser quebradiço, o método indicado é usado para fabricar os filamentos de lâmpadas incandescentes, que operam a temperaturas em torno de 2000^{o}C, situação em que a resistividade se eleva até próximo de lΩ mm^2/m, e assim 20 vezes superior àquela à temperatura ambiente. Na proteção contra as radiações X, usa-se uma liga de 93% de W, 5% de Ni e 2% de Cu.

O tungstênio ainda é usado em ligas sujeitas a temperaturas elevadas, como por exemplo, contatos com arcos voltaicos intensos.

2.3.14 Ferro (Fe)

O ferro se conhece à tempos remotos, havendo dado o nome a toda uma época pré- histórica, denominada idade do ferro. A princípio crê-se que o ferro utilizado na fabricação de utensílios, era obtido de meteoritos que a 50.000 anos devem ter caído com mais freqüência na superfície terrestre.

No Egito a 7.000 anos A.C. encontrou-se amuletos de ferro que provavelmente provinham de minérios beneficiados. Já na Índia a 912 anos A.C. encontrou-se uma coluna de ferro que media 7 m de altura e 40 cm de diâmetro com peso de 6 toneladas e que resistia perfeitamente aos agentes oxidantes, crê-se que esta coluna tenha sido derivada de um ferro pureza extraordinária.

A fabricação do aço partindo do ferro também é muito antiga, os Gregos, 500 anos A.C. já obtinham o aço (temperado). Crê-se que por uma maneira casual ao deixar alguma sobra de ferro com carvão de lenha, em contato com o carbono desprendido do mesmo, obteve-se um outro tipo de ferro com maior dureza.

Na verdade, a época que marcou a utilização do ferro foi nos anos de 1800, quando houve uma grande explosão industrial, esta beneficiada com o surgimento dos processos de obtenção do ferro de melhores qualidades.

As causas desta explosão foram:

- abundância de ferro na superfície terrestre;
- alto teor de ferro nos minérios;
- baixo ponto de fusão;
- bom condutor de calor e eletricidade;
- dúctil e maleável;
- magnetizável;
- boas propriedades mecânicas;
- podemos alterar suas propriedades através de tratamentos;
- forma lixos de excelentes características; etc.

A resistividade do ferro ou do aço é 6 a 7 vezes a do cobre, ou mesmo mais. Além de terem aplicação como materiais estruturais e magnéticos, o ferro e o aço são também largamente empregados como condutores elétricos, estando algumas aplicações listadas a seguir.

- circuitos de tração elétrica: nas estradas de ferro o circuito de retorno para a corrente elétrica é geralmente formado pelos próprios trilhos, soldados entre si ou ligados por curtos cabos de cobre. Nos sistemas em que se utiliza um terceiro trilho para condução da corrente elétrica (em lugar de uma linha aérea), empregam-se para o terceiro trilho aços doces, com resistividade de 7 a 9 vezes a do cobre.
- ligas de ferro para resistências elétricas: a grande maioria das resistências para aquecimento elétrico, ou para a confecção de reostatos, é manufaturada com ligas de ferro;
- linhas aéreas: nestas são utilizados freqüentemente tanto como condutores
- (eletrificação rural, aço galvanizado) como alma de cabos de alumínio, para
- aumentar a resistência mecânica.

Alguns materiais não-metálicos como o carvão, carbono e grafite também apresentam qualidades condutoras.

2.3.15 Carvão, Carbono e Grafite

O carbono (do latim carbo, carvão) é um elemento químico, símbolo C de número atômico 6 (6 prótons e 6 elétrons) e sólido a temperatura ambiente.

Dependendo das condições de formação pode ser encontrado na natureza em diversas formas alotrópicas: carbono amorfo e cristalino em forma de grafite ou de diamante. O diamante não é condutor de eletricidade.

O grafite é muito mais denso, melhor condutor de eletricidade, um tanto oleoso e menos sensível aos agentes químicos que os carbonos amorfos. Enquanto as propriedades do grafite são bem definidas, as dos carbonos amorfos dependem da sua origem e das condições de formação.

O grafite pode ser natural ou sintético. O natural ocorre na natureza e, na maioria das vezes, necessita de purificação e classificação granulométrica para ser utilizado comercialmente. O sintético é produzido a partir de outras formas de carbono como coque e antracita (forma amorfa do carvão, caracterizada pelo agrupamento caótico e aleatório dos seus átomos). Estes materiais são reduzidos a pó e compactados, às vezes com a presença de aglomerantes. Posteriormente são submetidos a altas temperaturas (em torno de 2200ºC), geralmente através da passagem de corrente elétrica. Este processo recebe o nome de grafitização. Ao produto assim obtido dá-se habitualmente o nome de carvão eletrografítico.

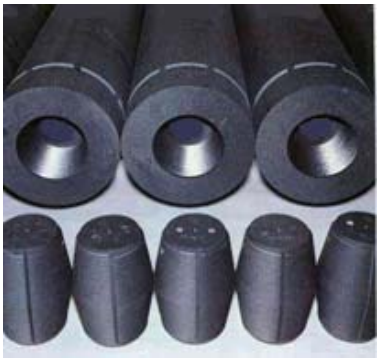
O grafite e o carvão eletrografítico são muito utilizados na tecnologia de resistores, de potenciômetros de carvão e na produção de eletrodos para fornos elétricos. Eles apresentam propriedades lubrificantes, pois oferecem um baixo coeficiente de atrito em contatos de peças deslizantes. Desta forma são utilizados como comutadores em escovas coletoras de motores.

Outras aplicações:

a) **Elementos de resistência:** As qualidades refratárias do carvão e a sua perfeita resistência ao choque térmico, aliados a um grande poder irradiante, tornam este material muito conveniente para a fabricação de resistências para altas temperaturas. As resistências de carvão apresentam-se sob a forma de barras de seção circular, cheias ou tubulares, toros, anéis, etc. A ligação do circuito às resistências de carvão exige precauções especiais, conseguindo-se, no entanto, um bom contato com o cobre.

b) **Resistências fixas elevadas:** Para a obtenção de resistividades mais elevadas que as do carbono (6000 $\mu\Omega cm^2/cm$) podem empregar-se aglomerados de carbono com uma base isolante mineral e um ligante orgânico que constituirão elementos de resistência elevada com bom poder de dissipação e um coeficiente de termorresistividade negativo.

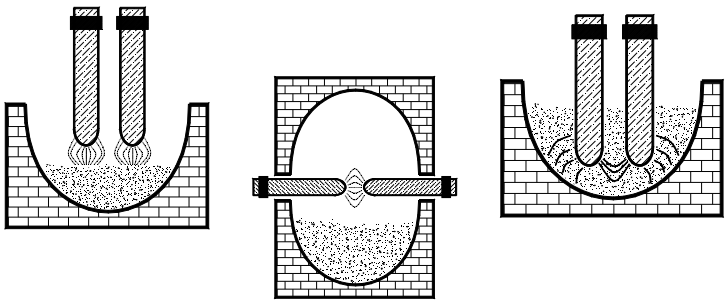
c) **Eletrodos para fornos de arco:** O eletrodo para forno elétrico constitui a forma em que maiores quantidades de carvão se consomem em eletrotécnica, podendo considerar-se dois grupos fundamentais: os de carvão amorfo e os de carvão eletrografítico, sendo muito raro o emprego da grafite natural.



Eletrodos de grafite para forno elétrico a arco

TIPOS DE FORNOS A ARCO:

Fornos a arco direto



Fornos a arco indireto

Comparativamente com os de carvão amorfo, os eletrodos de carvão eletrografítico apresentam o seguinte conjunto de vantagens:

- têm maior condutibilidade, o que reduz as perdas por efeito Joule e permite maiores densidades de corrente;
- têm menor suscetibilidade às ações químicas, queimando-se e desagregando-se menos;
- são mais puros, nomeadamente nos teores de ferro, silício e enxofre.

Em contrapartida, têm menor condutibilidade térmica, pelo que dão lugar a maiores perdas e são mais caros. O problema das impurezas é importante, pois vão influir na qualidade dos produtos fundidos, e daí as precauções necessárias na seleção dos eletrodos, especialmente nos de carvão amorfo.

Outro problema é o da ligação elétrica dos eletrodos, a qual exige precauções e técnica adequada por forma a manter sua continuidade.

Veja na tabela as propriedades de algumas variedades do carbono:

	RESISTIVIDADE $\mu\Omega \cdot cm$	DENSIDADE -
Carbono amorfo	3200 a 6500	1,98 - 2,10
Carvão eletrografítico	800 a 1200	2,20 - 2,24
Grafite natural	50 a 400	2,25

2.4 Materiais de elevada Resistividade

As ligas metálicas resistivas são utilizadas com três finalidades básicas:

- para fins térmicos ou de aquecimento;
- para fins de medição;
- para fins de regulação.

2.4.1 Ligas de Aquecimento

Tais ligas precisam ter uma elevada estabilidade térmica, tendo um bom comportamento corrosivo ou químico à temperatura local. Cada liga desse tipo possui uma temperatura máxima de serviço, que não pode ser ultrapassada, referida ao ambiente de serviço, geralmente em contato com o ar. Essas ligas possuem, muitas vezes, a propriedade de recobrirem-se por fina película de óxido, a qual protege o restante do metal contra a ação do ambiente. Tal película, porém, poderá romper-se se houver freqüentes

aquecimentos e resfriamentos, ou seja, freqüentes ligações e desligamentos da rede elétrica, reduzindo assim a durabilidade do componente. Na escolha dos componentes da liga, também podem ser de importância sua capacidade de dilatação e de irradiação.

Deve-se ter dados exatos de variação da resistência entre a temperatura ambiente e a máxima temperatura de serviço.

2.4.2 Ligas de Medição

Resistores para instrumentos de precisão admitem um coeficiente de temperatura máximo de 2,5x10-6/ºC, uma pequena tensão de contato com relação ao cobre e uma resistência praticamente constante. Tais ligas sofrem geralmente deformação a frio, o que pode acarretar "envelhecimento" sensível após algum uso. Por essa razão é comum aplicar-se um processo de envelhecimento artificial, para estabilizar o material, através de um tratamento térmico controlado, que elimina tensões internas, estabiliza e homogeneiza os cristais. Os tipos usados para resistências-padrão são muito diversos dos empregados para reostatos de partidas de motores, ou para regulação de aparelhos.

As ligas de níquel-cromo apresentam elevada resistividade e baixo coeficiente de temperatura para a resistência; por exemplo Nichrome V. As ligas de ferro-níquel, de custo muito menor que as de níquel-cromo, apresentam menor resistividade que essas e menor resistência à corrosão, por exemplo Nilvar. As ligas de cobre-níquel têm resistividade ainda menor, não resistem tão bem às altas temperaturas quanto as de níquel-cromo, porém apresentam coeficientes de temperatura praticamente desprezíveis, por exemplo Advance.

2.4.3 Ligas de Regulação

Nesse caso a faixa de temperatura se move entre 100 e 200^{o}C. As ligas ternárias de ferro, níquel e cromo são as que melhor satisfazem às condições de resistividade elevada, pequena variação da resistividade com a temperatura, grande resistência química aos agente oxidantes, carburantes ou sulfurantes e têm propriedades mecânicas capazes de permitirem um funcionamento prolongado a alta temperatura, sem deformação excessiva.

A presença de cromo melhora a resistência às ações químicas da liga e confere-lhe boas características mecânicas.

Há umas cinco ligas que habitualmente se empregam na resolução de problemas diversos, tais como: fabricação de reostatos, resistências de aquecimento para fornos, aquecedores e aparelhos de laboratório, etc.

Os fios resistentes são normalmente revestidos de uma película impermeável e isolante de óxido, a qual permite bobinar resistências com as espiras encostadas, desde que a diferença de potencial entre os pontos vizinhos não exceda qualquer coisa como 2V.

Isto permite fabricar reostatos de variação dita contínua, com um contato deslizantes. Estes reostatos suportam geralmente temperaturas da ordem dos 600^{o}C.

As ligas habitualmente empregadas são as seguintes:

- Liga A: 12Ni + 12Cr + 76Fe. Aplicada em resistências de aquecimento a temperatura moderada e reostatos de arranque de motores.

- Liga B: 36Ni + 11Cr + 53Fe. Aplicada em resistências de aquecimento a temperatura moderada. Aquecimento doméstico. Reostatos de motores de tração.

- Liga C: 48Ni + 22Cr + 30Fe. Aplicada na fabricação de radiadores, fornos de tratamento a altas temperaturas e em aparelhos de medida.

- Liga D: 60Ni + 15Cr + 25Fe. Aplicações análogas às da anterior.

- Liga E: 80Ni + 20Cr. Aplicável em radiadores luminosos, fornos de tratamento a altas temperaturas, aparelhos de laboratório e resistências de medidas.

As ligas com níquel e cromo têm elevada resistividade e baixo coeficiente de termorresistividade, associados a uma alta resistência à oxidação e à alteração a altas temperaturas.

As ligas cobre-níquel têm menor resistividade que as de níquel-cromo e resistem pior às altas temperaturas, mas têm um coeficiente de termorresistividade praticamente nulo às temperaturas normais, o que é importante para a construção de aparelhos de medida de precisão.

As ligas de cobre, níquel e zinco ou níquel e prata foram primitivamente utilizadas para aplicações elétricas, mas foram sendo preteridas em favor das anteriormente mencionadas.

2.5 Aplicações

Conforme apresentado anteriormente, os materiais condutores de corrente elétrica são classificados em dois grandes grupos:

- Materiais de elevada condutividade
- Materiais de elevada resistividade

Ao primeiro grupo destinam-se todas as aplicações em que a corrente elétrica deve circular com menores perdas de energia possíveis (tal como elementos de ligação entre aparelhos, dispositivos, etc.), ou ainda como elementos de circuitos que devem dar origem a uma segunda forma de energia por transformação elétrica (tal como em bobinas eletromagnéticas).

Os materiais do segundo grupo destinam-se, por um lado, à transformação da energia elétrica em térmica (tal como em fornos elétricos) e, por outro lado, para criar num circuito elétrico certas condições destinadas a provocar quedas de tensão e limitação de corrente para se obter um ajuste às condições adequadas ao circuito.

Neste tópico serão abordadas as aplicações especiais destes materiais em Engenharia Elétrica.

2.5.1 Resistores

Resistores são componentes capazes de transformar a energia elétrica em energia térmica, diminuir a tensão e limitar a corrente em vários pontos de um circuito.

Resistor elétrico

Resistor de lâmpada

Resistor de Chuveiro

Existem muitos tipos de resistores, porém em sua grande maioria são pequenos demais para se escrever o valor no corpo do mesmo. Desta forma, os fabricantes utilizam de um código de cores, que informa o seu valor.

Os resistores menores ainda, que são soldados diretamente na superfície da placa, nem sempre têm o valor impresso no seu corpo, sendo necessário recorrer ao manual técnico do equipamento para saber o valor correto.

Os resistores possuem pequenas variações na fabricação que fazem com que cada um deles apresente valor diferente do outro, mesmo que a aparência seja idêntica e que os valores nominais sejam iguais. Devido a isto, além do valor nominal do resistor, na superfície do mesmo vem impressa a tolerância, ou seja, quanto o valor daquele resistor pode variar acima e abaixo do valor nominal. Os resistores mais comuns são fabricados dentro da com tolerância de 5 ou 10% e possuem 4 faixas coloridas, enquanto os resistores mais precisos, com tolerância de 2, 1% ou menos, são marcados com 5 faixas coloridas para permitir um dígito a mais de precisão. Quando não apresentam a quarta faixa têm tolerância de 20%.

a) Como ler um resistor de 4 faixas

Para ler um resistor de 4 faixas coloridas deve-se prestar atenção ao seguinte: há uma cor que está mais próxima do extremo. Esta é a primeira cor a ser considerada na leitura.

A primeira cor deste extremo representa o primeiro dígito do valor. A segunda cor representa o segundo dígito. A terceira cor representa o fator exponencial multiplicativo. Por exemplo:

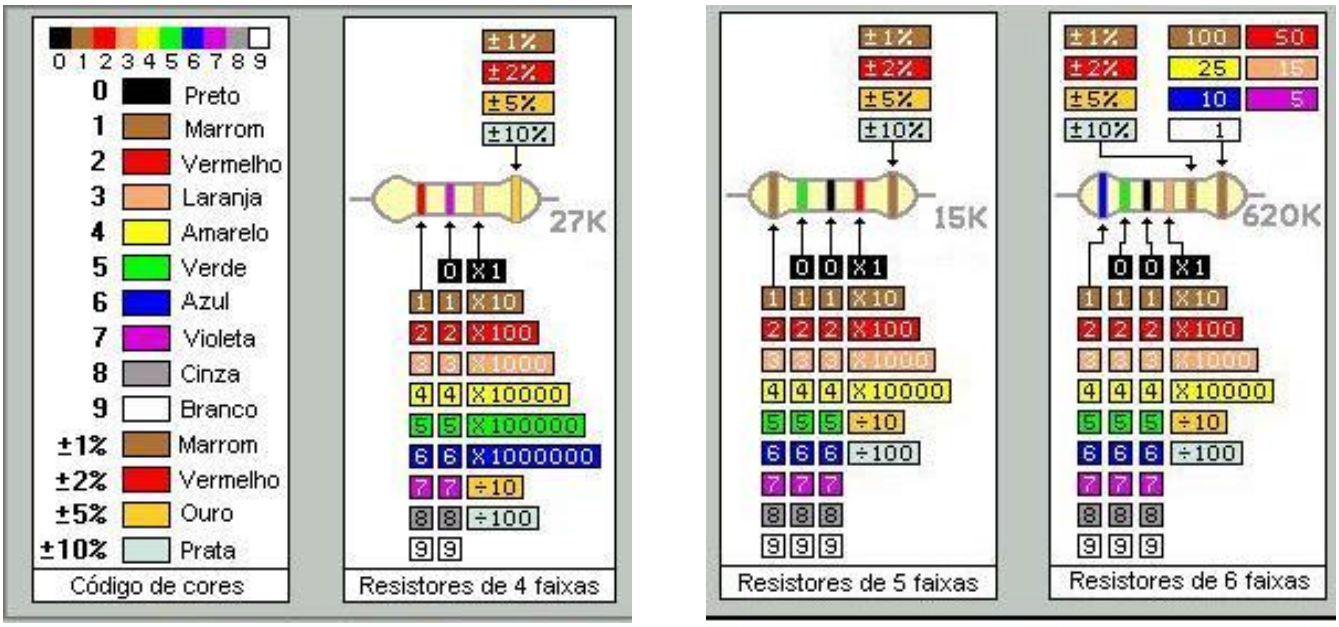
Marrom = 1
Preto = 0
Vermelho = 2
O valor deste resistor será 10 x10^2, ou seja, igual a 1000Ω.

b) Como ler um resistor de 5 ou 6 faixas

Quando o resistor é de precisão, apresenta 5 faixas coloridas. Como a última faixa destes resistores normalmente é marrom ou vermelha, pode haver uma confusão a respeito de onde é o lado certo para iniciar a leitura, já que a primeira faixa que representa o valor do resistor também pode ser marrom ou vermelha. Sendo assim, a exemplo do resistor de 4 listras coloridas, o melhor a fazer é observar a faixa que está mais próxima do extremo do resistor. Esta será a primeira faixa, por onde se deve iniciar a leitura. Outra dica é verificar a faixa que está mais afastada das outras. Esta é a última faixa de cor.

A leitura nestes resistores é semelhante à dos resistores com 4 cores, mas é adicionada mais uma cor no início, fazendo existir mais um algarismo significativo na medição. Assim, os três primeiros dígitos são os algarismos significativos, o que confere maior precisão na leitura. O quarto é o elemento multiplicador. O quinto dígito é a tolerância e o sexto dígito (quando existir) fará referência ao coeficiente de temperatura, ou seja, como a resistência varia de acordo com a temperatura ambiente. Este último valor é dado em PPM/ºC (partes por milhão por graus Celsius).

A tabela de cores dos resistores pode ser vista abaixo.

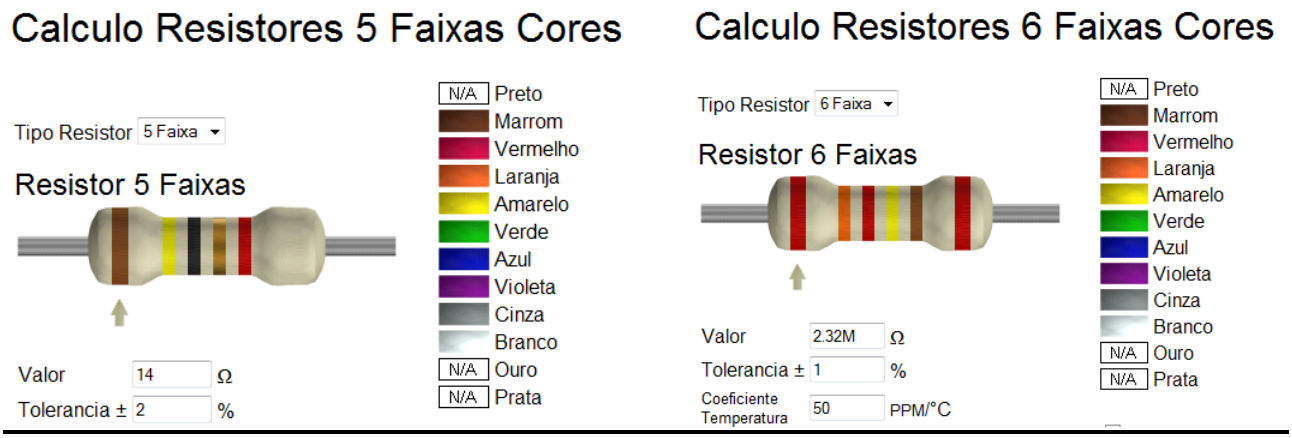


Exemplos

1º Faixa - Vermelho=2
2º Faixa - Vermelho=2
3º Faixa - Fator Multiplicativo - Marrom=10exp1=10
4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%
Valor do Resistor = 22 x 10 = 220Ω 5%

1º Faixa - Amarelo=4
2º Faixa - Violeta=7
3º Faixa - Fator Multiplicativo - Vermelho=10²=100
4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%
Valor do Resistor = 47x100=4700Ω ou 4,7KΩ ou 4K7Ω

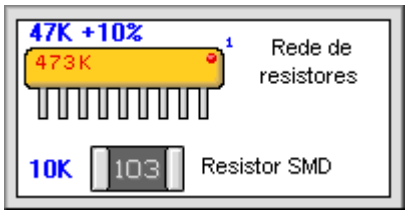
1º Faixa - Vermelho=2
2º Faixa - Vermelho=2
3º Faixa - Fator Multiplicativo - Amarelo=10exp4=10000
4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%
Valor do Resistor = 22x10000=220000Ω ou 220KΩ



Outros exemplos podem ser calculados em um simulador disponível no site:

http://www.rmeletronica.com.br/attachments/File/resistor/index.html

Resistores SMD



À medida que o tempo passa, menores são os equipamentos e, naturalmente, os componentes internos também acompanham esta diminuição do tamanho. Hoje, dentro desta filosofia, são encontrados facilmente resistores SMD nos aparelhos eletrônicos. Estes resistores são soldados na superfície da placa e, por serem muito pequenos, possuem números impressos no corpo, obedecendo à mesma idéia de contagem, porém com números ao invés de cores.

As redes de resistores (vários resistores dentro de um mesmo encapsulamento) também obedecem a esta metodologia.

Tipos de Resistores

Os resistores dividem-se basicamente em três tipos:

1) **Fixos:**

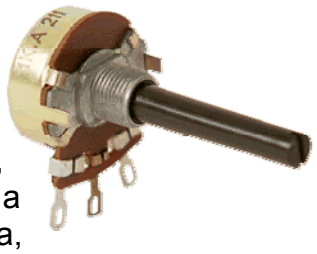
São aqueles de dois terminais, de valor ôhmico fixo. Os mais comuns são fabricados em película de carbono, sua potência varia de 1/8W até 2,5W e são identificados pelo código de cores. Outros, com potência acima de 5W são de fio, geralmente são

fabricados em níquel-cromo e os valores da resistência, potência e tolerância vêm impressos em seu corpo.

2) Ajustáveis:

São aqueles de três terminais, sendo o terminal central (cursor) móvel, permitindo ajuste por parafuso ou dispositivo semelhante. São normalmente utilizados para fazer ajustes finais na operação dos circuitos. Tais ajustes não sofrem controle externo ao circuito. São conhecidos como trimpots.

3) Variáveis:



Também possuem três terminais, onde o cursor móvel pode ser deslocado continuamente por ação de um eixo, variando a resistência entre os terminais fixos e móvel. São usados para controle externo de um determinado parâmetro do circuito. São conhecidos como potenciômetros. Assim como os resistores fixos, os potenciômetros são fabricados em carbono ou fio de acordo com a potência. Os potenciômetros, segundo a variação da resistência, podem ser lineares ou logarítmicos. Também podem ser com chave ou sem chave. A chave geralmente impõe uma resistência infinita entre dois de seus terminais no fim do curso da variação da resistência. Aplicados em circuitos limitadores de corrente, divisores de tensão, atenuadores resistivos, etc.

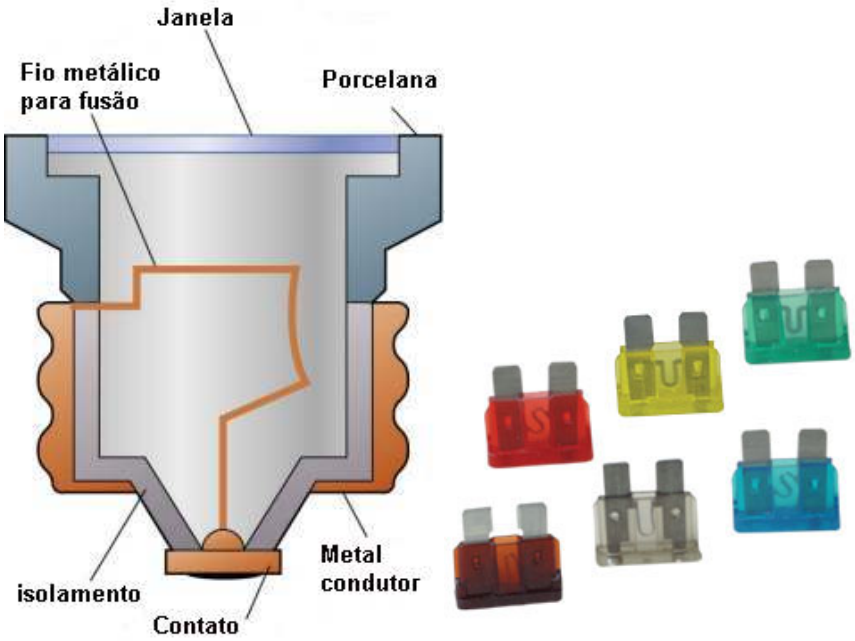
2.5.2 Fusíveis

Em eletrônica e em engenharia elétrica fusível é um dispositivo de proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos. Sobrecorrente ocorre quando o equipamento ou sistema elétrico passa a requerer, por alguma razão, uma corrente maior que a especificação normal, evento que pode ocorrer por tempo prolongado. Curto-circuito define-se como a especial e elevada corrente, cuja duração é inferior ao segundo, originada em decorrência de um defeito na instalação, circuito ou equipamento.

Consiste de um filamento ou lâmina de um metal ou liga metálica de baixo ponto de fusão que se intercala em um ponto determinado de uma instalação elétrica para que se funda, por efeito Joule, quando a intensidade de corrente elétrica superar, devido a um curto-circuito ou sobrecarga, um determinado valor que poderia danificar a integridade dos condutores com o risco de incêndio ou destruição de outros elementos do circuito.

Fusíveis e outros dispositivos de proteção contra sobrecorrente são uma parte essencial de um sistema de distribuição de energia para prevenir incêndios ou danos a outros elementos do circuito.

São dimensionados para suportar continuamente a corrente máxima do circuito ou aparelho protegido.

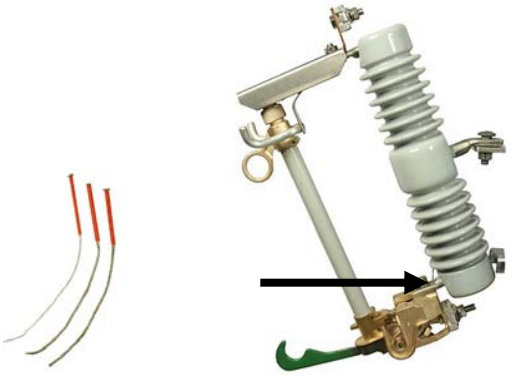


O funcionamento do fusível baseia-se no princípio segundo o qual uma corrente que passa por um condutor gera calor proporcional ao quadrado de sua intensidade. Quando a corrente atinge a intensidade máxima tolerável, o calor gerado não se dissipa com rapidez suficiente, derretendo um componente e interrompendo o circuito.

O tipo mais simples é composto basicamente de um recipiente tipo soquete, em geral de porcelana, cujos terminais são ligados por um fio curto, que se derrete quando a corrente que passa por ele atinge determinada intensidade. O chumbo e os estanho são dois metais utilizados para esse fim. O chumbo se funde a 327º C e o estanho, a 232º C. Se a corrente for maior do que aquela que vem especificada no fusível: 10A, 20A, 30A, etc, o seu filamento se funde (derrete).

Quanto maior for a corrente especificada pelo fabricante, maior a espessura do filamento. Assim, se a espessura do filamento do fusível suporta no máximo uma corrente de 10A e por um motivo qualquer a corrente exceder esse valor, a temperatura atingida pelo filamento será suficiente para derretê-lo, e desta forma a corrente é interrompida.

O fusível de cartucho, manufaturado e lacrado em fábrica, consiste de um corpo oco não condutivo, de vidro ou plástico, cujo elemento condutor está ligado interiormente a duas cápsulas de metal, os terminais, localizados nas extremidades.



Tipos de Fusíveis

Os fusíveis podem ser:

1) **Fusível de Rolha:** é o mais comum nas instalações domiciliares, utilizado normalmente em circuitos de iluminação e força com valores nominais de: 6-10-15-20-25-30A e tensão máxima de trabalho de 205V.

2) **Fusível de Cartucho:** Possuem elo fusível laminar ou cilíndrico. É utilizado em circuitos de correntes mais elevadas, principalmente de iluminação e força com valores nominais de corrente de: 10-15-20-25-30-40-50-60-100A e tensão máxima de 250V.

3) **Fusível tipo Faca:** Usado principalmente em circuitos de força, para correntes muito elevadas. O elo fusível é forma de lâmina e apresenta redução de seção em alguns lugares para localizar a área de fusão. Valores nominais de corrente de: 80-100-150-200-250-300-400-500-600A e tensão máxima de 500V.

4) **Fusível Diazed:** O elo fusível é uma chapa vazada com furos, utilizado em circuitos de força e iluminação, sendo produzidos tanto do tipo de fusão rápida quanto fusão lenta. Os de ação rápida são destinados a circuitos predominantemente resistivos enquanto que os de ação lenta (retardados) são indicados para proteção de motores, e cargas de altas correntes transitórias de energização, que não justificam a interrupção do circuito. Apresentam areia em seu interior para atenuar os efeitos da pressão, temperatura e arco durante a fusão do elo. Apresentam uma pedra colorida (chamada espoleta) que se desprende de sua posição quando o fusível é queimado. Valores nominais de corrente de: 6-10-15-20-25-30-60A (rápidos) e de 80-100-125-160-200A (retardados) com tensão máxima de até 500V. Também são encontrados os de alta capacidade, conhecidos por “tipo NH” que utilizam cerâmica como isolador.

5) **Fusível de Cartucho para altas tensões:** Empregado para correntes elevadas e em circuitos de média e alta tensão. É construído com invólucros isolantes de alta rigidez dielétrica, como a porcelana. Elo fusível: fio.

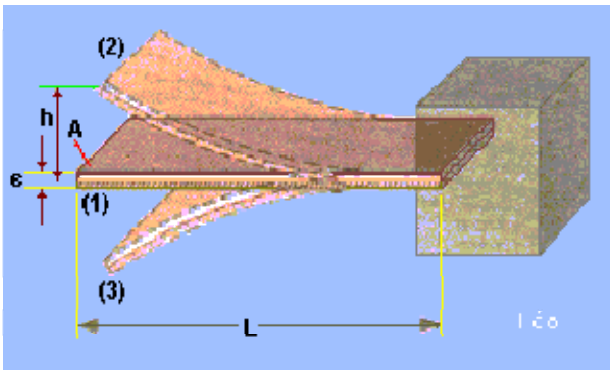
6) **Fusível para circuitos eletroeletrônicos:** Em formato de cartucho com invólucro de vidro ou cerâmico contem um filamento de liga de cobre ou prata. Usado para baixos valores de corrente com grande aplicação em proteção de aparelhos eletroeletrônicos.

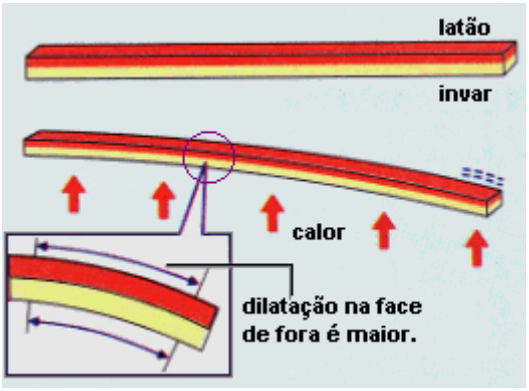
2.5.3 Bimetais

Os bimetais consistem em chapas compostas de duas folhas de metais diferentes passadas no laminador a temperatura bastante elevada para que elas sejam fortemente aderidas uma à outra. Às vezes, ao invés da técnica do laminador, as duas folhas são justapostas e soldadas à ponto.

As lâminas de bimetal são fabricadas para diversos fins; por exemplo: para unir, a resistência mecânica de uma folha, com a elevada resistência à corrosão de outra; ou mesmo para aproveitar os efeitos dos diferentes coeficientes de dilatação térmica.

Se unirmos duas tiras metálicas que têm coeficientes de dilatação lineares α_1 e α_2 muito diferentes, a deformação provocada pelos diferentes alongamentos, ou contrações, das partes sob a ação de uma variação de temperatura, pode ser usada para diversas aplicações. À certa temperatura (de repouso) as duas tiras têm o mesmo comprimento e a lâmina se apresenta plana, posição (1) na ilustração abaixo.



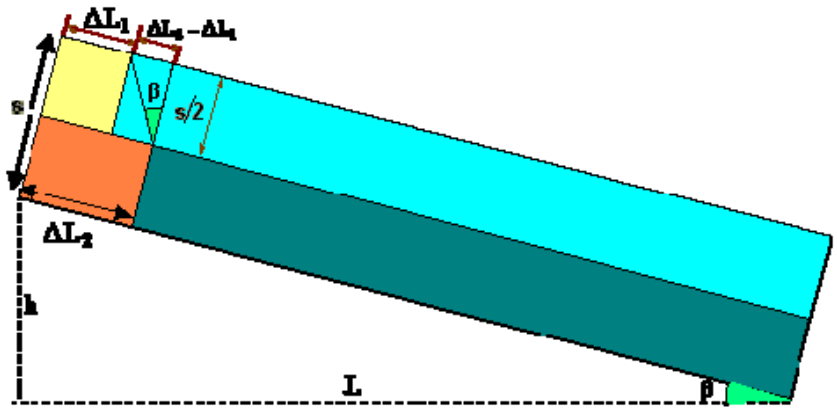


Um aumento de temperatura provoca nela a uniforme flexão no sentido do comprimento de modo que o metal A, menos sensível às variações térmicas, permanece no interior da concavidade - posição (2), ou seja, na face côncava.

Uma diminuição de temperatura provoca a deformação inversa - posição (3) ficando o material A (menor coeficiente de dilatação linear) na face convexa.

Os materiais usados correntemente são ligas de ferro e níquel cujos coeficientes de dilatação linear dependem fortemente da porcentagem de níquel; se esta porcentagem é de 36% obtém-se a liga ***invar*** que possui um α extremamente pequeno (daí seu nome, **invar**iável). O latão e o ***invar*** constituem um bom par para a lâmina bimetálica.

Para uma lâmina como a da ilustração acima pode-se assumir **h** como a medida da deformação provocada por uma variação de temperatura $\Delta\theta$ em relação à de repouso: em primeira aproximação a deformação é dada por:



$$\frac{k}{L} = \frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{s/2}$$

$$sk = 2L(\Delta L_2 - \Delta L_1) = 2L\Delta L_2 - 2L\Delta L_1 = 2L^2\alpha_2\Delta\theta - 2L^2\alpha_1\Delta\theta$$

$$sk = 2L^2\Delta\theta(\alpha_2 - \alpha_1) = 2L^2\Delta\alpha\Delta\theta$$

$$\boxed{h = (2L^2/s).\Delta\alpha.\Delta\theta}$$

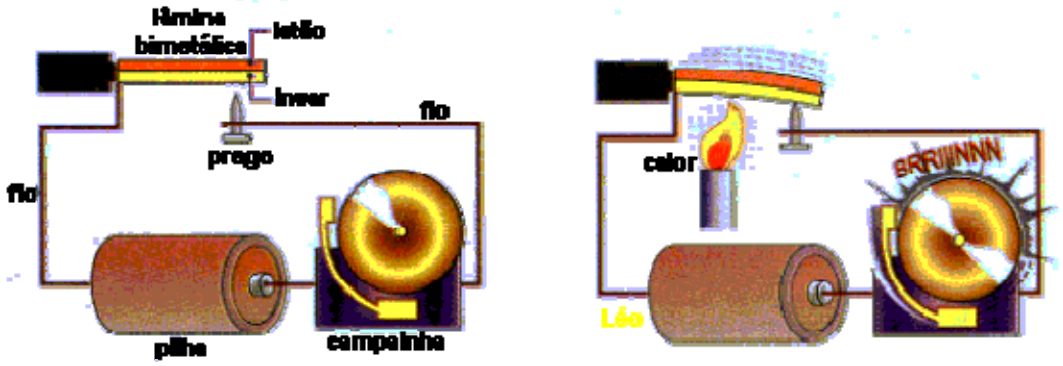
onde: **L** é o comprimento natural da lâmina, **s** é sua espessura e $\Delta\alpha$ **é** a diferença entre os coeficientes de dilatação linear dos dois materiais.

Para uma lâmina ferro-invar com **L** = 30 mm, **s** = 0,5 mm e para $\Delta\theta$ = 1 ^{o}C, resulta **h** $\underset{\sim}{}$ 0,04 mm.

As dimensões das lâminas bimetálicas dependem das características de robustez, de sensibilidade e de rapidez requeridas para as suas diversas aplicações; a espessura é geralmente compreendida entre 0,05 a 5 mm.

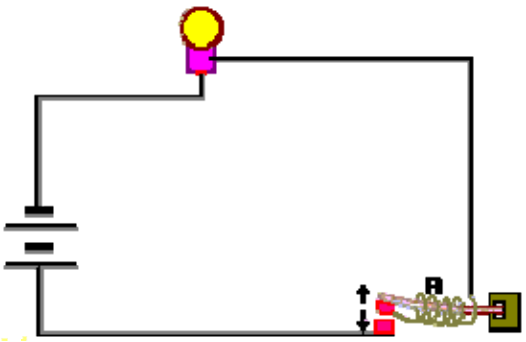
Nos dispositivos com lâmina bimetálica uma extremidade da lâmina é mantida fixa e é usado o deslocamento da extremidade livre para efetuar alguma ação. Tal deslocamento, eventualmente ampliado, pode ser transmitido a um indicador móvel sobre uma escala graduada: o dispositivo, uma vez calibrado, constitui um termômetro bimetálico (muito comum em tampas de fornos dos fogões a gás).

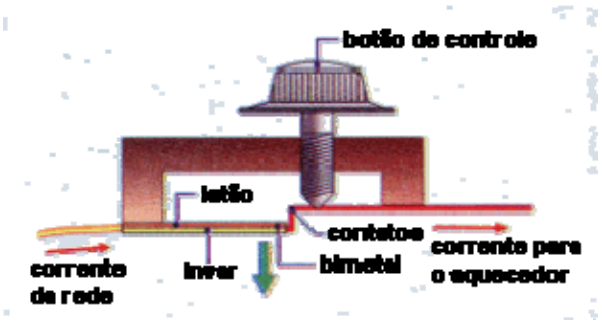
Mais freqüente é o uso de lâminas bimetálicas em aparelhos que efetuam automaticamente a abertura e o fechamento de um circuito elétrico onde a comutação pode ocorrer para valores pré-estabelecidos de temperatura. Eis uma ilustração didática para um alarme contra incêndio:



Aplicações típicas e muito difundidas são constituídas pelos interruptores de pulsação automática (intermitentes) nos quais o ligar e desligar de uma ou mais lâmpadas são comandados por uma lâmina bimetálica aquecida por um resistor de resistência R em série com a lâmpada.

Os termo-reguladores ou termostatos e os interruptores automáticos de sobrecarga funcionam sob este princípio básico das lâminas bimetálicas (abaixo, à direita). Nas decorações de árvores de natal mediante pequenas lâmpadas, uma das lâmpadas usa o próprio calor dissipado em seu funcionamento para acionar um interruptor bimetálico, em série (abaixo, à esquerda).





Termostatos de Lamina

Termostatos bimetálicos de lamina são amplamente utilizados com o objetivo de regular ou proteger o equipamento de um superaquecimento. Feito com bimetais snp-action e com disco ceramicos de ótima qualidade garantindo cliclos e vida de até 50.000 operações. Devido ao bimetal estar plenamente em contato com a superficia a ser controlada possui um ótimo grau de precisão de acionamento. Bastante utilizado em aplicações acima de 200°C , possui dois modos de ajuste, com pino de regulagem e parafuso fixo na temperatura. Disponivel numa faixa de temperatura de -0° C até 300°C, com capacidade de corrente de até 15A.

Algumas aplicações

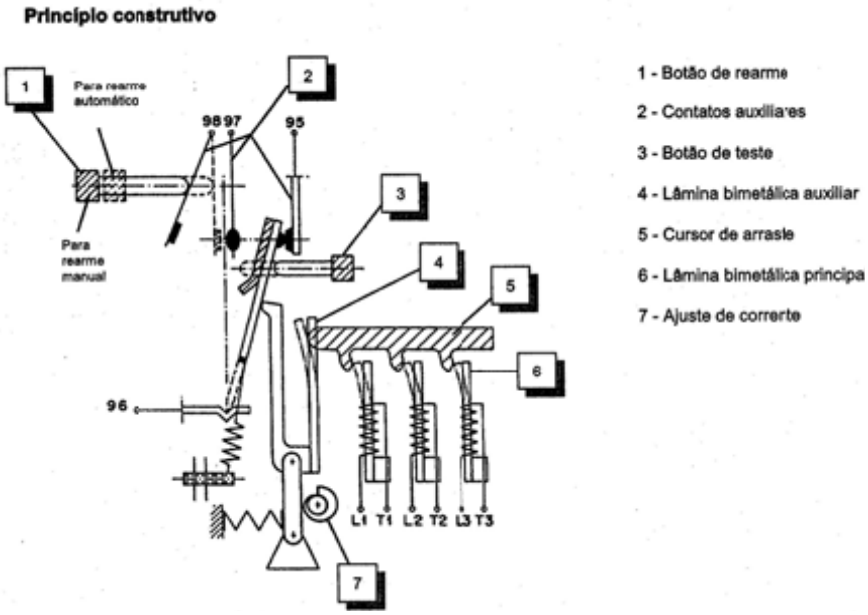
- **Fornos eletricos**
- **Estufas e esterilizadores**
- **Autoclaves**
- **Máquinas de fumaça**
- **Fritadeiras**
- **Maquinas de Estampas**

Beneficios e Vantagens

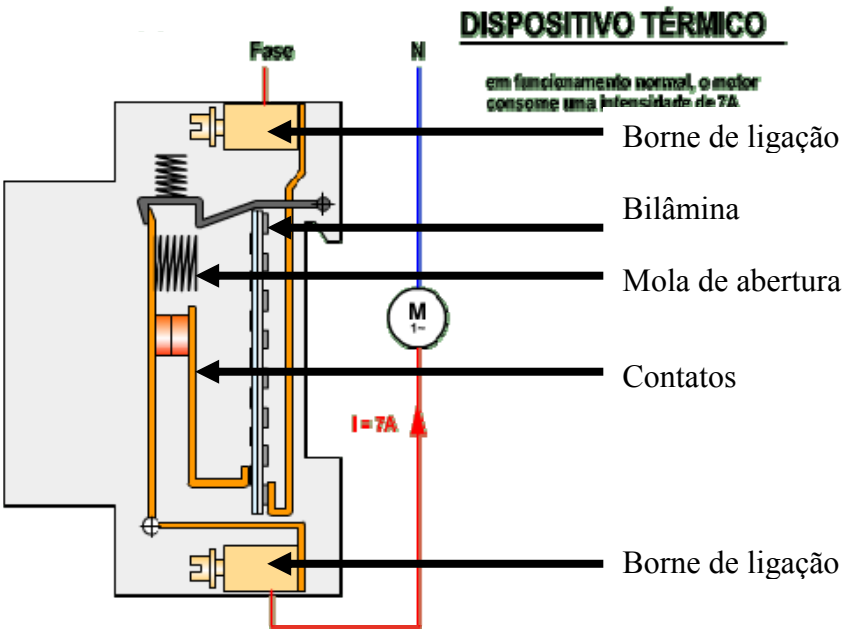
» Rápida Resposta
» Pode ser customizado
» Baixo custo / Alto Beneficio
» Evita queima do equipamentos que causam grandes prejuizos

Relés de sobrecarga bimetálicos

O relé de sobrecarga bimetálico é constituído de um par de lâminas metálicas (um por fase), com metais de dilatação térmica linear diferente e por um mecanismo de disparo, contidos num invólucro isolante com alta resistência térmica.

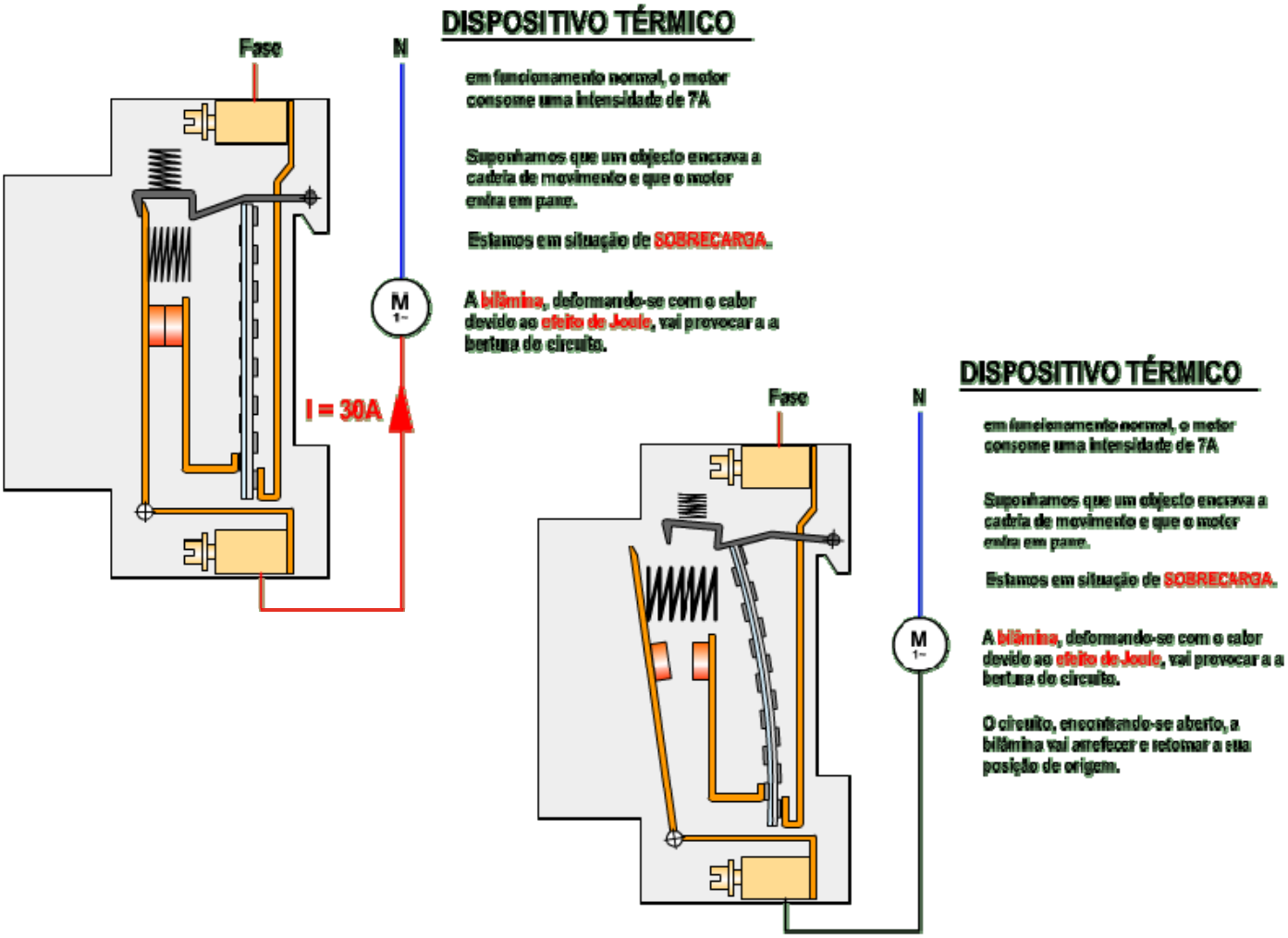


Disjuntores Termo-magnéticos



Um disjuntor é um aparelho de corte, comando e proteção. É um daqueles dispositivos que todos temos (vários) no quadro elétrico situado à entrada de nossas casas. A sua função é proteger os circuitos no interior destas. Cada um dos disjuntores é responsável por proteger uma parte da nossa instalação elétrica (iluminação, tomadas, máquina de lavar roupa, etc.).

Os disjuntores protegem os circuitos contra sobrecarga (acionamento térmico) e curto-circuito (acionamento magnético que será visto mais adiante), disparando quando se verifica uma destas situações e prevenindo assim danos na instalação que podem levar até ao incêndio.


DISPOSITIVO TÉRMICO
Fase
N
em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A
Suponhamos que um objecto encrava a cadeia de movimento e que o motor entra em pane.
Estamos em situação de SOBRECARGA.
A lâmina, deformando-se com o calor devido ao efeito de Joule, vai provocar a a bertura do circuito.
M
1~
I = 30A
DISPOSITIVO TÉRMICO
Fase
N
em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A
Suponhamos que um objecto encrava a cadeia de movimento e que o motor entra em pane.
Estamos em situação de SOBRECARGA.
A lâmina, deformando-se com o calor devido ao efeito de Joule, vai provocar a a bertura do circuito.
O circuito, encontrando-se aberto, a lâmina vai arrefecer e retomar a sua posição de origem.
M
1~

2.5.2 Fios e cabos condutores

Um fio é um segmento fino, cilíndrico, flexível e alongado de um certo material de acordo com sua função. São usados fios distintos para transportar tanto energia elétrica quanto informação. São feitos de metal, em geral cobre ou alumínio, revestido de plástico ou borracha isolante.

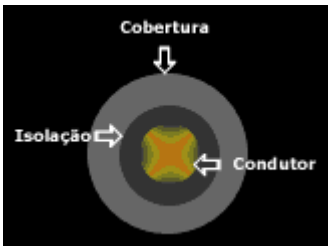
Basicamente, o que diferencia um fio de um cabo é a flexibilidade, suas características elétricas (capacidade de condução de corrente, resistência da isolação, etc.) são as mesmas. Os fios são feitos de um único e espesso filamento, e por isso são rígidos. Os cabos são feitos por diversos filamentos finos, o que lhes dá maleabilidade e facilitando seu manuseio.

São constituídos, fundamentalmente, por três partes distintas:

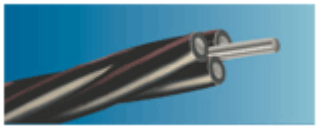
- CONDUTOR
- ISOLAÇÃO
- COBERTURA

Cada fio ou cabo deve conter as seguintes informações gravadas de forma contínua: bitola - isolação - temperatura - nome do fabricante.

Um cabo condutor elétrico pode ser constituído por uma quantidade variável de fios, desde um único fio até centenas deles.



CABOS DE ALUMÍNIO:



- Cabo Nú : Obtido através da reunião de vários fios dispostos concenticamante em torno de um fio central. Este fio central pode ser de alumínio (cabo CA) ou de aço (caboCAA).
- Multiplex: Os cabos multiplexados para 0,6/1KV são constituídos a partir da reunião de um, dois ou três condutores fases isolados ao redor de um condutor neutro de sustentação. A isolação é constituída por composto extrudado de polietileno termoplástico (PE) para temperaturas de operação do condutor de 70ºC, ou por composto termofixo e polietileno reticulado (XLPE) para temperaturas de operação de condutor 90ºC. O condutor neutro de sustentação pode ser formado por fios de alumínio sem alma de aço (tipo CA), ou com alma de aço (tipo CAA)

2.6 Supercondutores

Um metal a temperatura ambiente tem resistência elétrica pequena, porém não nula. Quanto menor a temperatura, menor a resistência do material.

Supercondutores são materiais que não oferecem resistência à passagem de corrente elétrica.

A supercondutividade só se verifica abaixo de uma determinada temperatura para cada tipo de material, chamada temperatura crítica. Quanto maior for esta temperatura para um dado material, maior será seu potencial para aplicações práticas.

O holandês Heine Kammerlingh-Onnes achava que a resistência deveria diminuir cada vez mais, chegando a zero no zero absoluto. Ele argumentava que as vibrações dos átomos do

metal, que dificultam o deslocamento dos elétrons e causam a resistência, deveriam cessar no zero absoluto. Nesse caso, a resistência elétrica cairia a zero gradualmente.

Kelvin previa que os próprios elétrons deveriam se "congelar" no zero absoluto. Assim, a resistência elétrica na temperatura zero seria infinita. Para resolver esse debate só medindo a resistência dos metais em baixíssimas temperaturas.

No início do séc. XX, Kammergingh-Onnes, começou então a medir a resistividade de metais em baixíssimas temperaturas. De início, o metal escolhido por ele foi o mercúrio que tinha a vantagem de poder ser altamente purificado. O resultado da experiência foi surpreendente. Ao atingir 4,2 Kelvins (-268,95 ºC) a resistência elétrica do fio de mercúrio caiu subitamente a zero! Não foi caindo gradualmente, como pensava Onnes, nem foi para infinito, como queria Kelvin. Como o próprio Onnes disse:

"o mercúrio a 4,2 K entra em um novo estado, o qual, devido a suas propriedades elétricas, pode ser chamado de estado de supercondutividade".

Este resultado foi apresentado por Onnes em um artigo publicado em uma revista científica holandesa em Maio de 1911, com o título "Sobre a variação da resistência elétrica de metais puros em temperaturas muito baixas. O desaparecimento da resistência do mercúrio".

Nos anos seguintes, a supercondutividade foi verificada em vários metais e ligas, mas, sempre, em temperaturas muito baixas.

Em 1956, o físico americano Leon Cooper mostrou que os elétrons que transportam a "supercorrente" se associam em pares enquanto se deslocam pelo material. Estes pares, chamados “pares de Cooper” poderiam ser os responsáveis pela corrente supercondutora em materiais a baixas temperaturas. Normalmente, dois elétrons com carga negativa, não podem chegar perto um do outro por causa da forte repulsão coulombiana. No entanto, Cooper sugeriu que, dentro de um sólido metálico, dois elétrons poderiam vencer essa repulsão mútua com a ajuda de uma excitação da rede cristalina do material, comumente chamada de "fônon".

Um fônon é uma excitação mecânica que se propaga pela rede cristalina de um sólido. Normalmente, essa excitação, que se desloca como uma onda pelo material, é causada pela agitação natural existente em todo sistema sujeito a uma temperatura finita. Ela consiste de pequenos deslocamentos dos átomos da rede. É claro que, quanto maior a temperatura maior o número de fônons, e esses fônons se propagam em todas as direções dentro do material.

Os átomos da rede cristalina de um metal não são eletricamente neutros. Normalmente, eles perderam elétrons e se tornaram positivamente carregados. São os elétrons perdidos que transportam corrente elétrica pelo sólido. Um elétron que se desloca através do material vai perturbando os átomos da rede, atraindo-os por força coulombiana. Essa perturbação é um fônon que sai, de algum modo, na rasteira do elétron, como uma turbulência que segue um carro.

O fônon gerado pela passagem de um elétron, sendo uma onda de átomos positivos deslocados, pode capturar outro elétron que esteja por perto. Isso forma o par de Cooper: dois elétrons ligados através de um fônon da rede. O fônon formado de cargas positivas deslocadas permite que os elétrons, que normalmente se repelem, viajem em conjunto pelo sólido. Em temperatura alta, a agitação térmica é tão forte que um par de Cooper não consegue se manter vivo e logo se quebra. Em baixas temperaturas, no entanto, as chances melhoram.

Em 1957, Cooper, juntamente com John Bardeen, Robert Schrieffer propuseram uma teoria (a Teoria BCS, das iniciais dos autores) que explicava o fenômeno da supercondutividade através da análise detalhada dos pares de Cooper. Neles, os elétrons têm energia ligeiramente inferior à energia dos elétrons individuais. Em termos técnicos, diz-se que existe um "gap" de energia separando os elétrons emparelhados dos elétrons normais.

Quando um elétron, em um condutor normal, interage com os átomos da rede, dá-se uma troca de energia. Nesta interação, o elétron pode transferir energia para os átomos, como uma bola de sinuca se chocando com outra, e, no processo, os átomos são "excitados". Esta vibração nos átomos das redes provoca o aquecimento do material.

No entanto, se dois elétrons já estiverem ligados em um par de Cooper, essa interação com outros átomos da rede só será possível se a energia trocada for igual ou maior que a energia do "gap". Quando a temperatura é alta, há muita disponibilidade de energia térmica para isto, e os pares de Cooper nem conseguem se formar, ou, quando se formam, são logo aniquilados. No entanto, baixando-se a temperatura, pode-se chegar a um valor no qual a energia disponível para trocas térmicas é menor que a energia do "gap". Assim, alguns pares de Cooper não são aniquilados pela agitação térmica. Mesmo que os elétrons de um par se choquem com átomos da rede, não haverá troca de energia entre eles.

Em processos quânticos, como são esses choques, só pode haver troca de energia se o "gap" for vencido. Não pode haver troca parcial de energia. O choque, se houver, será "elástico", sem perda de energia pelos elétrons.

A temperatura crítica (TC) do material é uma medida do tamanho do "gap" de energia. Em um supercondutor típico, como o mercúrio utilizado nas pesquisas, por exemplo, a energia do "gap" é bem pequena, da ordem de 0,01 eletron-volt. Por isso, as temperaturas críticas desses supercondutores são tão baixas.

Nos anos seguintes à descoberta da supercondutividade por Onnes, muitos materiais supercondutores foram encontrados, quase todos metálicos. No entanto, todos tinham temperaturas críticas baixíssimas. Até o início da década de 80, o recorde era o nióbio (Nb3Ge), com TC perto de 23 K (-250 ºC).

A teoria BCS indicava que dificilmente supercondutores com temperaturas críticas acima de 25 K seriam encontrados em virtude da energia do "gap". Porém, em 1986, dois físicos que trabalhavam no laboratório da IBM em Zurich, na Alemanha mudaram o rumo das pesquisas neste tema. Descobriram que um material cerâmico à base de óxido de cobre, bário e lantânio, ficava supercondutor a 30K.

Em Abril de 1986, Georg Bednorz e Alex Mueller sintetizaram uma cerâmica com fórmula Bax La_5-xCu_5O_5(3-y). Esse material é uma cerâmica do tipo perovskita que, na forma de silicatos, é abundante na crosta terrestre, a areia. É perceptível pela fórmula que eles partiram de um composto normal, de óxido de cobre com bário e lantânio, e foram retirando oxigênio em várias proporções.

Vários outros compostos desta mesma família foram descobertos por laboratórios de todo o mundo, com temperaturas críticas cada vez mais elevadas. Até que, em Janeiro de 1987, Paul Chu, da Universidade de Houston, mostrou que o $YBa_2Cu_3O_7$ é supercondutor com uma incrível temperatura crítica acima de 90 K.

Hoje, são conhecidos supercondutores com temperatura crítica acima de 130 K.

O nitrogênio é o elemento mais abundante de nossa atmosfera (~80%) e é relativamente barato e fácil de liquefazer (TC = 77 K).

Vale salientar que quando se fala de supercondutores de alto TC, estamos falando em temperaturas críticas ainda muito baixas, da ordem de -150^{o}C.

A maioria dos supercondutores de alto TC consiste de cerâmicas com estrutura de perovskita modificada. O curioso é que tais materiais são maus condutores de eletricidade na temperatura ambiente.

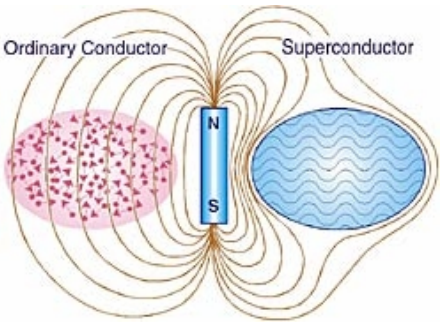
Ainda está a surgir uma teoria satisfatória para explicar o mecanismo da supercondutividade nestas cerâmicas. A teoria BCS não funciona a contento para estes supercondutores. Por outro lado, parece que existem pares de Cooper nos supercondutores de alto TC. Não se sabe ao certo se o mecanismo de formação desses pares é o mesmo que nos supercondutores tradicionais. Isto é posto em dúvida através das evidências de atuação dos spins no acoplamento de elétrons. Como disse Sir Nevil Mott, decano da Física do Estado Sólido, o número de teorias "explicando" a supercondutividade das cerâmicas é igual ao número de teóricos.

Outros materiais estão em teste, entre eles: supercondutores orgânicos, fulerenos, rutenatos, além de um novo interesse nos velhos metais. Há pouco foi descoberto que o MgB2, composto aparente inócuo que estava esquecido nas prateleiras dos químicos, fica supercondutor a 40 K. Como é um material mais fácil de manusear que as cerâmicas, renovou-se a esperança de achar metais ou similares com altas temperaturas críticas.

Existem dois tipos de supercondutores:

- **tipo I** - Estes supercondutores são, além de condutores perfeitos, diamagnéticos perfeitos (fluxo magnético nulo no interior), ou seja, neles, o efeito Meissner é total.

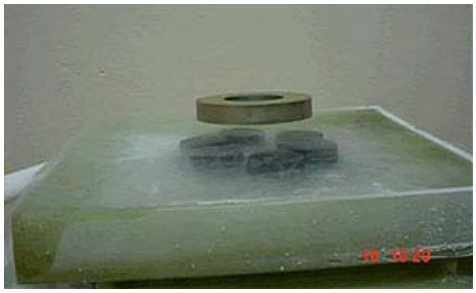
EFEITO MEISSNER: descoberto em 1933 por W. Meissner



Em um condutor elétrico comum, elétrons desordenados e incoerentes permitem a penetração de um campo magnético externo.

Em um supercondutor, o funcionamento coletivo coerente dos elétrons espontaneamente exclui um campo magnético externo e mantém sua condição de impenetrabilidade.

A demonstração clássica deste efeito consiste em fazer um ímã permanente flutuar sobre a superfície de um supercondutor. As linhas do campo magnético são impedidas de penetrarem no supercondutor e tomam uma forma semelhante a que teriam se houvesse outro ímã idêntico dentro do material supercondutor. Desta forma, o ímã sofre uma repulsão que compensa seu peso e o faz "levitar" sobre o supercondutor.



- **tipo II** - há uma pequena penetração das linhas de campo magnético para dentro do material. Estes costumam suportar correntes mais fortes do que os do tipo I, sem perder a condição de supercondutor. Suas temperaturas críticas são mais elevadas, logo, são mais promissores para possíveis aplicações.

As aplicações são várias, como construção de bobinas com fios supercondutores, que possibilitam gerar campos magnéticos intensos, os quais seriam impraticáveis se fossem utilizados fios comuns, como exemplo, fios de cobre. Estas bobinas podem ser usadas na construção de Maglev, trens que levitam; aparelhos de ressonância magnética nuclear, que geram um campo magnético homogêneo na região onde o paciente é colocado e um sensor capta informações que formarão as imagens e, por fim, sensores SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), que permitem realizar medidas magnéticas extremamente sensíveis.

O Maglev (Magnetic Levitation) japonês.

Plásticos SUPERcondutores!

A revista Nature divulgou a obtenção de um material plástico que, sob baixas temperaturas, não imprime resistência alguma à passagem de elétrons, o que o torna um supercondutor. Os plásticos podem conduzir eletricidade: foi justamente este o tema para o último prêmio Nobel em Química.

O que os pesquisadores do Bell Labs criaram foi o primeiro supercondutor plástico, um material relativamente barato quando comparado aos supercondutores atuais. Estes materiais terão grandes aplicações futuras, como em computadores quânticos e eletrônica de supercondutividade. O grupo desenvolveu uma técnica especial para "arrancar" elétrons de uma amostra sólida de um polímero (politiofeno). A amostra é uma fina camada do polímero, onde as cadeias poliméricas estão emparelhadas lado a lado, sem entrelaçamento. Eles, então, removem elétrons desta amostra, por um método desenvolvido e patenteado no Bell Labs. Este polímero, a temperaturas abaixo de -200 ^{o}C, se torna, então, supercondutor. "With the method we used, many organic materials may potentially be made superconducting now", profetiza a química Zhenan Bao. Ou, como resumiu o físico Ananth Dodabalapur, "A new window into nature has opened up".

CAPÍTULO III

MATERIAIS ISOLANTES

São chamados isolantes os materiais de baixa condutividade. Apresentam os elétrons de valência rigidamente ligados aos seus átomos, não permitindo a passagem de corrente elétrica. Tais materiais têm a propriedade da alta rigidez dielétrica e por isso, são também chamados materiais dielétricos.

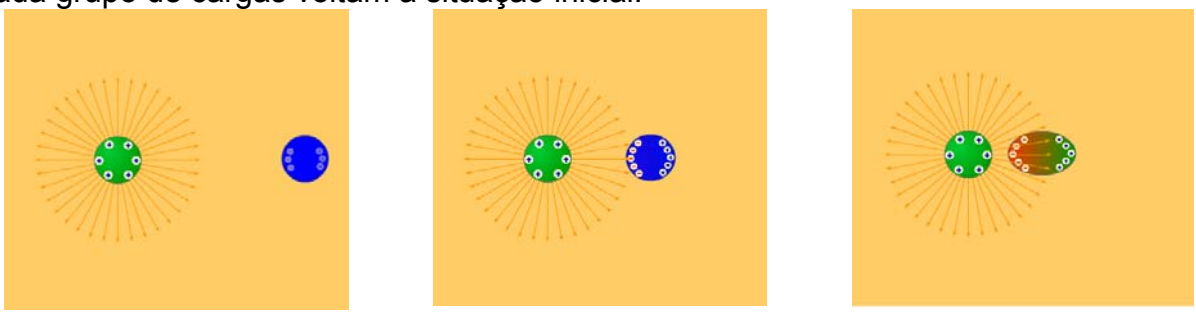
Quando um campo elétrico é aplicado a um material isolante as cargas são ligeiramente deslocadas e os elétrons são movidos para posições diferentes das suas posições de equilíbrio, ocorrendo uma polarização, chamada de polarização dielétrica.

3.1 Polarização Dielétrica

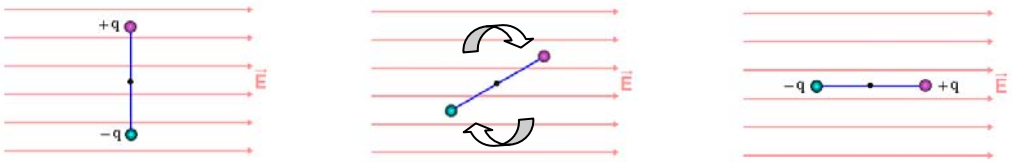
Uma propriedade fundamental dos materiais dielétricos é a polarização de suas partículas elementares, quando sujeitas à ação de um campo elétrico. Define-se por ***polarização*** um deslocamento reversível dos centros das cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado. Por ser reversível, esta direção acompanha, ou pelo menos tende a acompanhar, a própria orientação do campo elétrico aplicado.

A polarização de um dielétrico pode ocorrer das duas maneiras:

1) Se o isolante é constituído de átomos, que não apresentam momento dipolar, então o deslocamento dos núcleos das cargas positivas e negativas sob a ação de campos externos é tanto maior, quanto mais elevada a intensidade do campo que é aplicada e com ele, a ação de força deste campo. Uma vez eliminado o campo externo, os átomos voltam à sua posição inicial, a polarização desaparece, pois os centros de cada grupo de cargas voltam à situação inicial.



2) Se o dielétrico for constituído de partículas elementares (elétrons, prótons, etc.) que por si só já são dipolos (por exemplo, moléculas) que, devido à sua constituição química já são dotados de cargas positivas e negativas, a ação do campo elétrico externo tenderá a orientar as partículas de acordo com a própria orientação do campo externo. Quanto mais intenso é o campo, tanto mais elevado é o trabalho de orientação das partículas elementares, observando-se de modo mais acentuado a elevação de temperatura, devido à transformação do trabalho de orientação em calor. Dependendo da estrutura do dielétrico, pode ocorrer uma polarização mesmo com total ausência de energia externa.



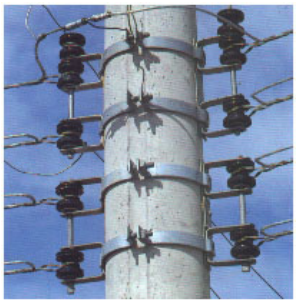
3.2 Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente

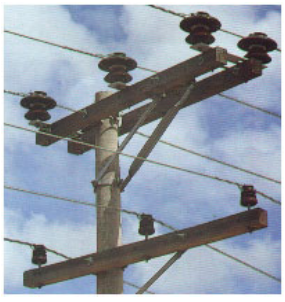
Exemplos de materiais isolantes:

a) **gasosos**:
   i. ar – amplamente utilizado como isolante em redes elétricas de transmissão e distribuição;
   ii. hexafluoreto de enxofre (SF_6) – usado em isolamentos de cabos subterrâneos e disjuntores de alta potência (subestações);

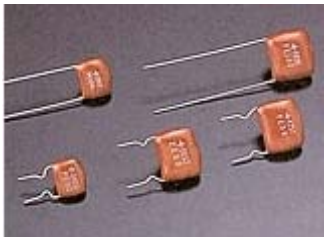
b) **fibras naturais**: papel impregnado em resinas ou óleos, algodão, seda – usados em suportes isolantes e em revestimentos de cabos, capacitores e bobinas;

c) **cerâmicas:** óxido de alumínio, titanato de bário, porcelana, etc. – utilizadas basicamente em isoladores de baixa, média e alta tensão, e em capacitores de baixa e alta tensão (elevada constante dielétrica);





d) **resinas plásticas**: Poliéster, polietileno, PVC (Poli Cloreto de Vinila), Teflon, etc. – aplicados em revestimentos de fios e cabos, capacitores e peças isolantes;

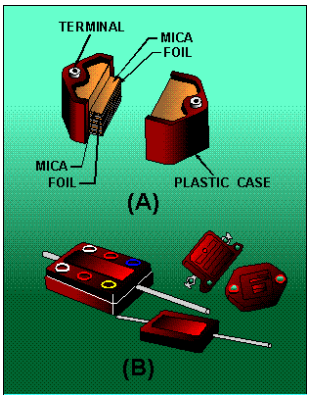


e) **líquidos:** Óleos (mineral, ascarel, óleo de silicone – atuam nas áreas de refrigeração e isolação em transformadores e disjuntores a óleo. Também empregados para impregnar papéis usados como dielétricos em capacitores.

f) **tintas e vernizes**: compostos químicos de resinas sintéticas – Têm importante emprego na tecnologia de isolação de componentes eletrônicos como: esmaltação de fios e cabos condutores, isolação de laminados ferromagnéticos, circuitos impressos e proteção geral de superfícies;

g) **borrachas sintéticas**: neoprene, EPR (Epileno Propileno), XLPE (Polietileno Reticulado) e borracha butílica –usados como capa protetora de cabos;

h) **mica**: material mineral usado em capacitores e em ligações entre transistores de alta potência;



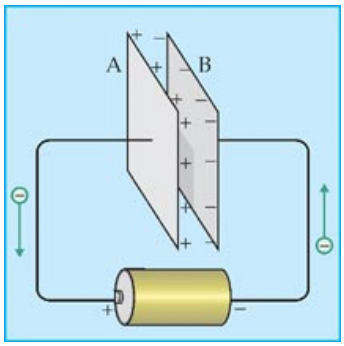
i) **vidro**: principal emprego em isoladores de linhas de transmissão. As fibras de vidro são usadas no lugar dos papéis em algumas aplicações.

j) **madeira:** grande utilização em cruzetas dos postes de distribuição.

3.3 Aplicações

Conforme apresentado anteriormente, os materiais isolantes podem ser usados na fabricação de diversos equipamentos e dispositivos elétricos/eletrônicos. Alguns deles veremos mais detalhadamente na seqüência.

3.3.1 Capacitores



Capacitores são dispositivos destinados a armazenar cargas elétricas.

São constituídos por dois condutores separados por um isolante. Os condutores são chamados armaduras (ou placas) do capacitor e o isolante é o dielétrico do mesmo. Tal dielétrico pode ser um isolante qualquer como o vidro, a parafina, o papel e, muitas vezes, o próprio ar.

Podem ser esféricos, cilíndricos ou planos, de acordo com a forma de suas armaduras. Quando eletrizadas, as armaduras armazenam cargas elétricas de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

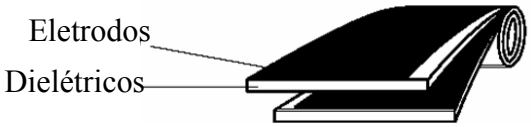
Na figura ao lado, a armadura A tem, inicialmente, potencial elétrico nulo e está conectada ao terminal positivo da pilha; logo, os elétrons migram da armadura para a pilha. Já a armadura B, que também tem potencial elétrico nulo, está conectada ao terminal negativo da pilha, e assim elétrons migram do terminal da pilha para a armadura B.

Acontece que, enquanto a armadura A está perdendo elétrons, ela está se eletrizando positivamente e seu potencial elétrico está aumentando. O mesmo ocorre na armadura B, só que ao contrário, ou seja, B está ganhando elétrons, eletrizando-se negativamente, e seu potencial elétrico está diminuindo.

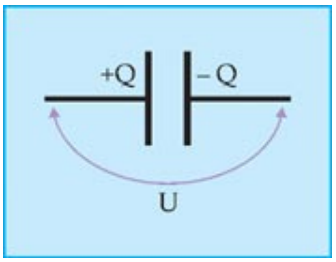
Este processo cessa ao equilibrarem-se os potenciais elétricos das armaduras com os potenciais elétricos dos terminais do gerador (pilha), ou seja, quando a diferença de potencial elétrico (ddp) entre as armaduras do capacitor for igual à ddp nos terminais da pilha dizemos que o capacitor está carregado com carga elétrica máxima.

Num circuito, só há corrente elétrica no ramo que contém o capacitor enquanto este estiver em carga ou em descarga.

Os capacitores são constituídos por uma composição de eletrodos (armaduras ou placas) e dielétricos.



CAPACITÂNCIA



O capacitor tem inúmeras aplicações na elétrica e na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo.

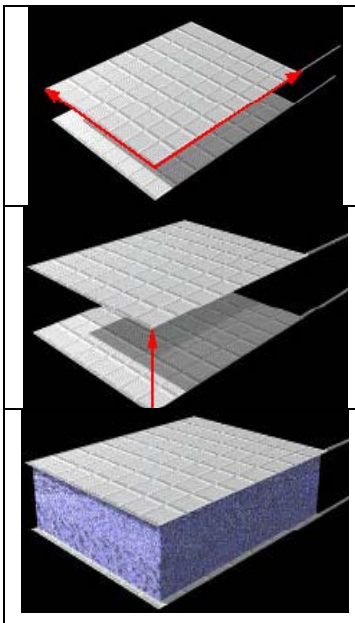
A quantidade de carga armazenada na placa de um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial entre as placas.

A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial (U) que existe entre as placas:

$$C = \frac{Q}{U}$$

A unidade de capacidade eletrostática, no SI, é o Farad (F).

FATORES QUE AFETAM A CAPACITÂNCIA



Dimensões

Quanto maior a placa, maior a capacitância;

Afastamento

Quanto mais distante a placa menor a capacitância;

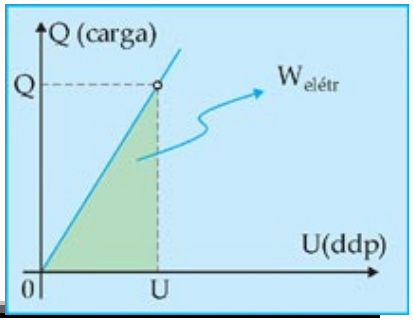
Material

Dependendo dos materiais utilizados, a capacitância pode ser maior ou menor. Isto se dá em função da constante dielétrica (ε) do material utilizado como isolante. Na tabela ao lado pode-se perceber a variação desta grandeza para cada material.

Material	εr
vácuo	1
ar	1,0006
alumínio	8,1 - 9,5
esteatita (MgO-SiO2)	5,5 - 7,2
mica	5,4 - 8,7
óleo	4
papel	4 - 6
papel parafinado	2,5
plástico	3
polistireno	2,5 - 2,6
porcelana	6,0
pyrex	5,1
sílica fundida	3,8
Titanatos	50 - 10000
vidro de cal de soda	6,9

ENERGIA ARMAZENADA

O gráfico ao lado representa a carga elétrica Q de um capacitor em função da ddp (U) nos seus terminais.



Como, neste caso, Q e U são grandezas diretamente proporcionais, o gráfico corresponde a uma função linear, pois a capacidade eletrostática C é constante.

Considerando que o capacitor tenha adquirido a carga Q quando submetido à ddp (U) do gráfico, a energia elétrica $W_{elétr}$ armazenada no capacitor corresponde à área do triângulo hachurado.

$$W_{elétr} = \frac{Q \cdot U}{2}$$ e como $Q = C \cdot U$, então: $$W_{elétr} = \frac{C \cdot U \cdot U}{2} \Rightarrow \boxed{W_{elétr} = \frac{C \cdot U^2}{2}}$$

Exercícios Resolvidos

01. Carrega-se um capacitor de capacidade eletrostática 5 μF com carga elétrica de 20 μC. Calcule a energia potencial elétrica armazenada no capacitor.

Resolução

Calculando a ddp U nos terminais do capacitor:

$$C = \frac{Q}{U} \Rightarrow U = \frac{Q}{C} \qquad U = \frac{20\mu C}{5\mu F}$$

$$U = \frac{20 \cdot 10^{-6}\,C}{5 \cdot 10^{-6}\,F} \qquad U = 4\,V$$

Calculando a energia elétrica armazenada:

$$W_{elétr} = \frac{Q \cdot U}{2} \Rightarrow W_{elétr} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 4}{2}$$

$$\boxed{W_{elétr} = 4 \cdot 10^{-5}\,J}$$

02. Um capacitor armazena $8 \cdot 10^{-6}$ J de energia elétrica quando submetido à ddp U. Dobrando-se a ddp nos seus terminais, a energia armazenada passa a ser:

Resolução

Sendo:

$$W_{elétr} = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow \frac{W_{elétr}}{U^2} = \frac{C}{2} = \text{constante},$$

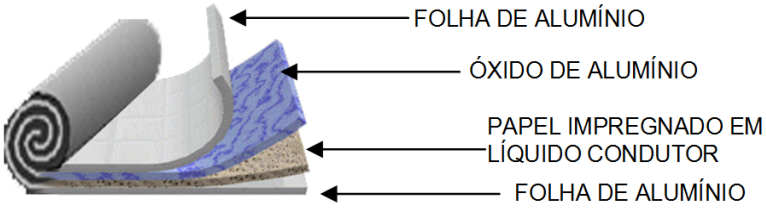
$$\text{então: } \frac{W'}{(2U)^2} = \frac{W}{U^2}$$

$$\frac{W'_{elétr}}{4 \cdot U^2} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{U^2} \Rightarrow \boxed{W'_{elétr} = 32 \cdot 10^{-6}\,J}$$

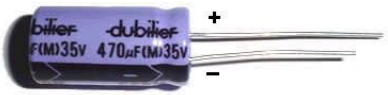
Os capacitores são amplamente utilizados em rádios, gravadores, televisores, circuitos elétricos de veículos, etc.

Os capacitores podem ser de valores de capacitância fixos ou variáveis.
Dentre os ***capacitores fixos*** ressaltam-se os seguintes:

a) Capacitores Eletrolíticos



São formados por uma folha fina de alumínio (placa positiva) recoberta por uma camada finíssima de óxido de alumínio que atua como um dielétrico (o óxido de alumínio é um excelente dielétrico, com ε = 10). Sobre a camada de óxido é colocada uma tira de papel impregnado com um líquido condutor chamado eletrólito, ao qual se sobrepõe uma segunda lâmina de alumínio (placa negativa) em contato elétrico com o papel.



O "sanduíche" assim formado é enrolado e colocado no interior de uma "caneca" de alumínio, vedada por uma espécie de tampão de borracha.

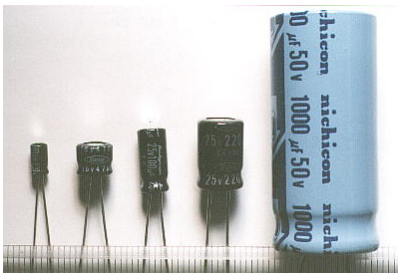
Grandes valores de capacitância podem ser obtidos em comparação com o tamanho do capacitor devido à pequena espessura do dielétrico ser extremamente fina.

Uma das principais características de um capacitor eletrolítico é que eles têm polaridade (terminal positivo e terminal negativo). Isso significa que deveremos ter cuidado ao conectá-los ao circuito.

Se o capacitor for submetido a uma tensão maior que a de trabalho ou se a polaridade for invertida ele pode ser danificado (ou até mesmo explodir !). Além disso este tipo de capacitor não é adequado para operar em elevados níveis de freqüência.

Geralmente em um diagrama o lado positivo é indicado com um "+" (mais), mas pode ser que o terminal com indicação seja o negativo.

A faixa de valores pode variar de 1μF a milhares de μF. Esse tipo de capacitor é usado principalmente em fontes de alimentação, para diminuir o efeito *ripple,* que representa uma oscilação de tensão ocorrida nos terminais de uma ponte retificadora a diodos. A figura a seguir mostra alguns modelos encontrados no comércio.



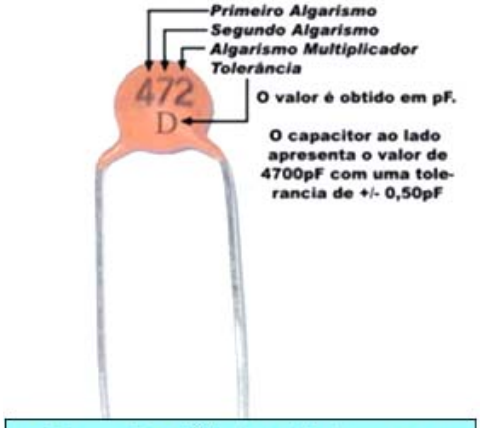
Na Figura, da esquerda para a direita temos:

1μF (50V) diâmetro 5 mm, altura 12 mm
47μF (16V) diâmetro 6 mm, altura5 mm
100μF (25V) diâmetro 5 mm, altura11 mm
220μF (25V) diâmetro 8 mm, altura12 mm
1000μF (50V) diâmetro18 mm, altura40 mm

b) Capacitores de Tântalo

Capacitores de tântalo são capacitores eletrolíticos que usam um material chamado de tântalo para os eletrodos. Grandes valores de capacitância podem ser obtidos, similares aos de alumínio. Contudo, os capacitores de tântalo são superiores no que se refere à temperatura e freqüência de operação, sendo, portanto, um pouco mais caros e mais recomendados para aplicações em que se deseja que o valor da capacitância seja constante com a temperatura e freqüência. Usualmente o símbolo "+" é usado para indicar o pólo positivo.

c) Capacitores Cerâmicos



Internamente estes capacitores não têm estrutura de bobinas, por isso mesmo podem ser usados em circuitos que aterram sinais de alta freqüência. Estes capacitores têm a forma de um disco.

Os capacitores cerâmicos apresentam impressos em seu corpo, um conjunto de três algarismos e uma letra, conforme a figura ao lado.

Para se obter o valor do capacitor (geralmente expresso em pF), os dois primeiros algarismos, representam os dois primeiros dígitos do valor do capacitor e o terceiro algarismo, chamado multiplicador, representa o número de zeros à direita. A letra representa a tolerância (faixa de valores em que a capacitância poderá variar), que pode ser omitida. Esta última, para os capacitores cerâmicos até 10pF é expressa em pF e para aqueles acima de 10pF é expressa em porcentagem. Por exemplo um capacitor com 224F impresso no próprio corpo, possuirá uma capacitância de 220000pF com uma tolerância de +/- 1% (seu valor pode ser um por cento a mais ou a menos desse valor.)

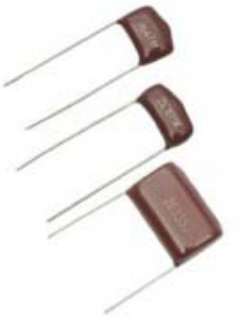
Tolerância

Até 10pF	Acima de 10pF	
B=0,10pF	F=1%	M=20%
C=0,25pF	G=2%	P=+100%-0%
D=0,50pF	H=3%	S=+50%-20%
F=1pF	j=5%	Z=+80%-20%
G=2pF	K=10%	

d) Capacitores de Filme de Poliestireno

Nestes capacitores, um filme de poliestireno é usado como dielétrico. Este tipo de capacitor não pode ser usado em circuitos de altas freqüências, pois eles são construídos com estruturas de bobinas. São usados em circuitos de filtro e circuitos de tempo que operem até algumas centenas de KHz ou menos.

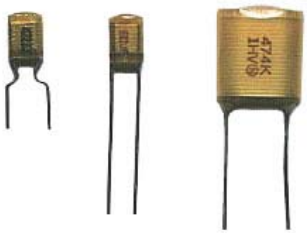
e) Capacitores de Filme de Poliéster



Estes capacitores usam um fino filme de poliéster como dielétrico, sua tolerância é de cerca ±5% to ±10%. Não têm polaridade.

f) Capacitores de Polipropileno

São usados quando houver necessidade de pequena tolerância. A capacitância destes capacitores praticamente não muda. Estes capacitores têm uma tolerância de ±1%.



g) Capacitores de Mica

Nestes capacitores a mica é usada como dielétrico. Apresentam boa estabilidade em função do seu pequeno coeficiente de temperatura. Têm excelentes características de freqüência, sendo usados em circuitos ressonantes e filtros de alta freqüência. Por possuírem boa isolação, são ideais para circuitos tensão mais elevadas. Não têm polaridade e não possuem grandes valores de capacitância.

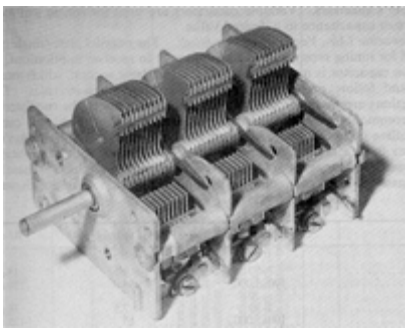
h) Capacitores de Papel

Capacitores de filtro com dielétrico de papel são volumosos e seu valor é em geral limitado a menos do que 10 μF. Eles não são polarizados e podem suportar altas tensões. São fabricados enrolando-se uma ou mais folhas de papel entre folhas metálicas. Todo o conjunto é envolvido em resina termoplástica. Esse tipo de componente é barato e é aplicado em usos gerais.

Para melhorar as características o papel pode ser impregnado com óleo, o que ocasiona:

- Aumento da rigidez dielétrica.
- Aumento da margem de temperatura de aplicação do capacitor.
- Aplicação de altas tensões.

i) Capacitores Variáveis



Outra categoria importante é a dos ***capacitores variáveis***. Estes dispositivos são compostos por um conjunto de placas fixas intercalado com um de placas móveis que podem girar em torno de um eixo comum. Assim, pode-se

controlar a área das superfícies condutoras submetidas ao campo elétrico, controlando assim, a capacitância.

Foi bastante empregado na sintonia dos receptores de rádio com válvulas, com o ar como dielétrico. Porém, com o advento dos transistores, surgiu a necessidade da redução do seu tamanho, o que foi obtido através da utilização de filme plástico como dielétrico ao invés do ar.

Com construção similar, porém com apenas duas placas, podemos citar pequenos capacitores ajustáveis normalmente utilizados em rádios portáteis e em diversos dispositivos eletrônicos que têm capacitâncias máximas em torno de 500 pF. O valor exato da capacitância é ajustado na fábrica, durante as fases de montagem e calibração daqueles aparelhos; assim, os capacitores ajustáveis em geral ficam dentro do equipamento, fora do alcance do usuário.

Estes pequenos capacitores recebem o nome de:

1. Trimmer

Também conhecido como CAPACITOR COMPENSADOR. Normalmente utiliza dielétricos como a mica e o próprio ar.

É constituído por duas lâminas metálicas (armaduras), uma fixa e outra móvel, separadas por uma fina folha de mica. O espaçamento entre as armaduras pode ser controlado por meio de um parafuso de ajuste:

- Com o parafuso totalmente apertado = lâminas próximas, a capacitância é máxima;
- Com o parafuso totalmente desapertado = lâminas separadas, a capacitância é mínima.

Capacitores
Trimmers

2. Padder

Também conhecido como capacitor corretor de rateio tem sua construção semelhante à do Trimmer. É constituído por dois conjuntos de placas metáticas, entrelaçadas e separadas por folhas de mica. Em alguns tipos, a capacitância por ser ajustada desde 120 pF até 550 pF; em outros, de 300 pF até 600 pF.

3.4 Comportamento dos dielétricos em Serviço

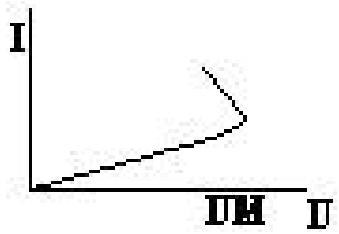
Uma vez que uma certa porção de isolamento apresenta uma dada resistência, podemos falar em resistividade do material. Esta geralmente é influenciada por uma diversidade de fatores. Por exemplo, a temperatura afeta sensivelmente o valor da resistividade e, de uma maneira geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade dos materiais isolantes. Vejamos algumas destas propriedades.

3.4.1 Resistência de Isolamento

O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas.

Este impedimento, porém, não é total, pois, se uma determinada porção do isolante estiver submetida a uma tensão U, ela será atravessada por uma corrente I, sendo o quociente entre U e I designado por resistência de isolamento.

A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem de uma forma geral, à lei de Ohm. No caso do comportamento dos gases, já vimos que só para valores baixos de tensão estes obedecem àquela lei. No caso dos dielétricos sólidos, a curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, sendo de uma forma geral do tipo da apresentada na figura abaixo.



A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor UM da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

Esta última parte da curva corresponde à perfuração do isolamento ou, pelo menos, antecede-a de um pequeno intervalo de tempo, pois a libertação de calor engrandecida pelo aumento da corrente vai rapidamente provocar a perfuração.

3.4.2 Resistência Superficial

No caso dos isolantes sólidos de grande resistividade, a resistência através da sua massa é também elevada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Contudo, pela acumulação de poeira e umidade na superfície das peças isoladoras se forma um novo caminho para a passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser a resistência superficial.

Isto acontece especialmente nas peças isoladoras expostas ao tempo, como por exemplo, os isoladores de linhas de transmissão aéreas. À resistência do novo circuito é dado o nome de resistência superficial e, neste caso, a resistência de isolamento é dos dois circuitos em paralelo, superficial e de massa.

3.4.3 Rigidez Dielétrica

Para poder exprimir numericamente a capacidade de um determinado material isolante suportar tensões elevadas, define-se uma grandeza a que se dá o nome de rigidez dielétrica e que é definida como sendo o valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante.

Esta grandeza depende de muitos fatores, tais como a espessura do isolante, as dimensões e forma dos eletrodos utilizados para a aplicação da tensão, a freqüência da tensão aplicada, o número de aplicações de tensão na unidade do tempo (fadiga do material), a temperatura, grau de umidade, etc.

Como é difícil conhecer o valor do campo no momento da ruptura, por não ser normalmente uniforme, é costume definir-se a rigidez dielétrica (RD) simplesmente pelo quociente da tensão aplicada no momento da ruptura pela espessura do isolamento.

3.4.4 Rigidez Dielétrica Superficial

No caso dos isolantes sólidos, pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa, salte pela sua superfície. Ao quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Esta depende, evidentemente, da forma do isolante e do estado da sua superfície.

3.4.5 Ruptura dos Dielétricos

Quando o campo elétrico a que um dado dielétrico está sujeito ultrapassa um determinado valor se dá a ruptura do dielétrico. A maneira como esta se produz e as suas conseqüências são porém, diferentes conforme o tipo de dielétrico.

Assim, é compreensível que, se a ruptura se produzir num dielétrico fluido, a matéria atingida pela descarga é logo substituída por outra e, se o fenômeno não repetir, a sua única conseqüência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido.

No caso dos dielétricos sólidos isto não acontece, pois a descarga implica a sua destruição no ponto em que a ruptura se verifica.

3.4.6 Efeito Corona

Se, entre dois condutores, existir uma grande diferença de potencial, junto às suas superfícies poderá surgir um campo elétrico de valor tal que o gás ou o ar, no meio do qual se encontram seja ionizado.

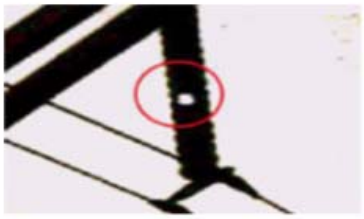
Se isto acontecer, o efeito obtido é equivalente ao aumento das dimensões dos condutores, visto o gás ou o ar ionizado se tornar condutor também. Nessas condições, dá-se como que uma aproximação dos condutores e um aumento da sua superfície.

De uma maneira geral, podemos dizer que, se os condutores forem de pequena seção e estiverem bastante afastados, o efeito da ionização traduz-se por uma diminuição do campo na zona circunvizinha. Desta forma, ionizada a primeira camada que envolve os condutores, a ionização não prossegue nas camadas seguintes e o fenômeno não progride.

A ionização limita-se como que a uma bainha à volta dos condutores, visível sob o aspecto de uma luz azulada e sensível ao ozônio. Esta situação é aquilo a que chamamos de efeito coroa ou corona.

Se a forma e a distância dos condutores forem outras, pode dar-se o contrário, isto é, o campo ir mantendo nas camadas sucessivas valores suficientemente altos para provocarem a ionização até o ponto de se estabelecer um caminho de gás ou ar ionizado entre os condutores.

As cargas elétricas deixam de encontrar resistência e passam em grande quantidade de um condutor para o outro, sob a forma de um arco. É a descarga elétrica.



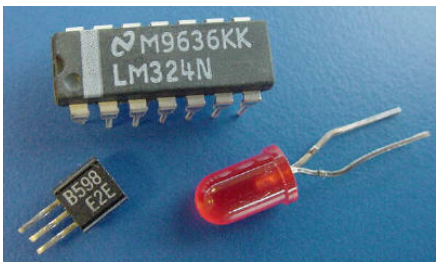
CAPÍTULO IV

MATERIAIS SEMICONDUTORES

Um dos triunfos das teorias cinética e atômica é sua capacidade de dar conta de quase todas as propriedades físicas da matéria, explicando, por exemplo, por que alguns materiais são bons condutores de calor, enquanto outros não o são. Existe uma classe intermediária de substâncias, chamadas semicondutores, que possuem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor. Desta forma, são melhores condutores do que os isolantes de eletricidade, mas não tão bons condutores como o cobre. Tais materiais se mostram extremamente úteis para a eletrônica.

Em comparação com os metais e com os isolantes, as propriedades elétricas dos semicondutores são afetadas por variação de temperatura, exposição à luz e acréscimos de impurezas.

Um semicondutor puro como o elemento silício apresenta uma condutividade elétrica bastante limitada; porém se pequenas quantidades de impurezas são incorporadas à sua estrutura cristalina, suas propriedades elétricas alteram-se significativamente. O material pode passar, por exemplo, a conduzir eletricidade em um único sentido, da forma como age um diodo. A adição de uma outra impureza lhe confere a propriedade de conduzir eletricidade apenas no outro sentido.



Em sentido horário, de cima para baixo: um chip, um LED e um transistor são todos feitos de material semicondutor

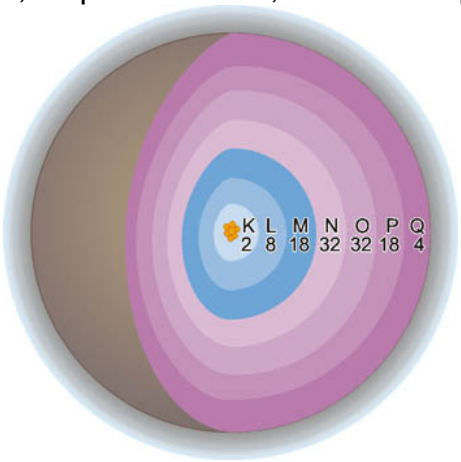
Para uma correta compreensão do funcionamento destes materiais, faz-se necessário recordar alguns conceitos já vistos.

4.1 Níveis de Energia

A maneira com que os elétrons se distribuem nas órbitas em torno do núcleo do átomo não é aleatória. Segue regras bem definidas, que são as mesmas para todos os elementos.

Um elétron em órbita tem uma energia potencial que depende da sua distância até o núcleo e uma energia cinética que depende da sua velocidade. A soma de ambas é a energia total do elétron.

Conforme a Teoria Quântica os estados da matéria não variam continuamente, mas sim em pequenos intervalos discretos, chamados quanta. No mundo prático isso não é perceptível porque os valores são muito pequenos, mas, os elétrons são partículas elementares e o seu comportamento é bem definido por tais intervalos. Assim, a energia total que o elétron pode ter é definida em valores discretos e, portanto, ele só pode ocupar determinadas órbitas ou níveis de energia. Os níveis possíveis são sete podendo ser representados pelos números 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ou pelas letras K, L, M, N, O, P e Q. Para os 113 elementos químicos conhecidos, segundo o **princípio de exclusão de Pauli**, o número máximo de elétrons em cada nível é 2, 8, 18, 32, 32, 18, 4, respectivamente, conforme representado na figura seguinte.



$$2n^2$$

onde n é o número do nível.

Assim, o nível 1 poderá possuir no máximo 2 elétrons, o nível 2 poderá ter no máximo 8 e assim sucessivamente.

É regra geral na natureza a estabilização na menor energia possível. Assim, os níveis são preenchidos na seqüência do menor para o maior e um nível só poderá conter elétrons se o anterior estiver completo.

Em cada camada ou nível de energia, os elétrons se distribuem em subcamadas ou subníveis, representados pelas letras s, p, d, f, em ordem crescente de energia. O número máximo de elétrons de cada subnível também foi determinado experimentalmente:

Subnível	S	p	d	f
Número máximo de elétrons	2	6	10	14

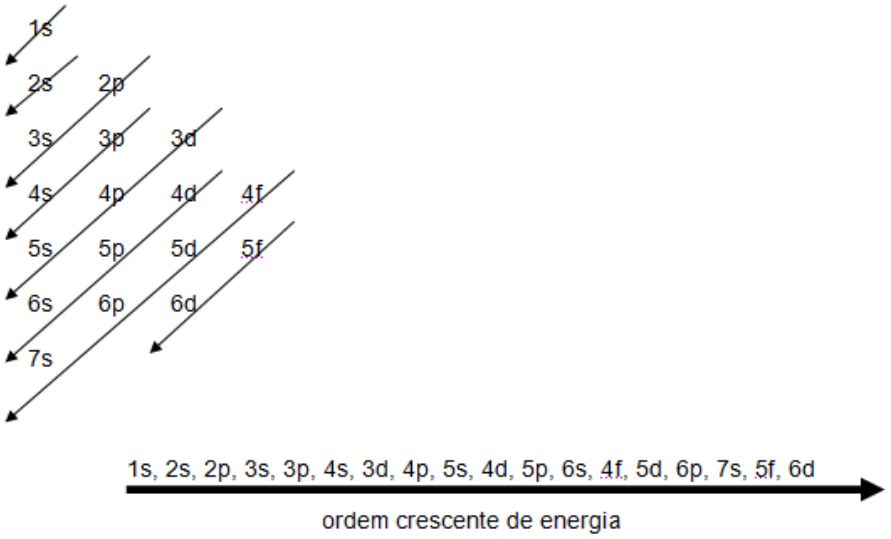
O número de subníveis que constituem cada nível de energia depende do número máximo de elétrons que cabem em cada nível. Assim, como no primeiro nível cabem no máximo 2 elétrons este nível apresenta apenas um subnível s, no qual cabem os dois elétrons. O subnível s do primeiro nível de energia é representado por 1s.

Como no segundo nível cabem no máximo 8 elétrons, o segundo nível é constituído de um subnível s, no qual ficam 2 elétrons, e um subnível p, com no máximo 6 elétrons. Deste modo o segundo nível e formado por dois subníveis representados por 2s 2p, e assim por diante.

Resumindo:

Nível	Camada	Nº máximo de elétrons	Subníveis conhecidos
1º	K	2	1s
2º	L	8	2s e 2p
3º	M	18	3s, 3p e 3d
4º	N	32	4s, 4p, 4d e 4f
5º	O	32	5s, 5p, 5d e 5f
6º	P	18	6s, 6p e 6d
7º	Q	8	7s

Linus Gari Pauling (1901-1994), químico americano, elaborou um dispositivo prático que permite colocar todos os subníveis de energia conhecidos em ordem crescente de energia. É o processo das diagonais, denominado Diagrama de Pauling, representado a seguir.



Vejamos um exemplo:

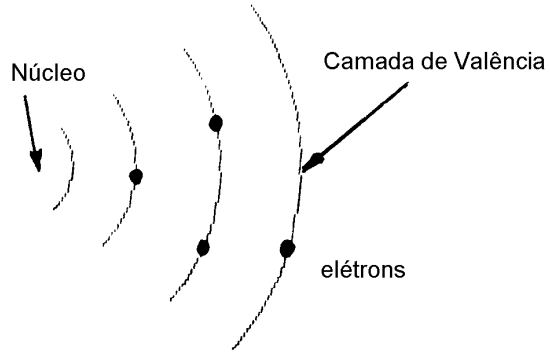
A camada de valência do As (arsênio), cujo número atômico é 33, é a camada N, pois é o último nível que contém elétrons.

A distribuição eletrônica deste átomo fica assim:

$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^3$

O número 4 corresponde à camada N. O subnível p da camada N, neste caso não está completo, pois sobraram apenas 3 elétrons para este subnível. A camada N, neste caso formada pelos subníveis s e p, soma um total de 5 elétrons. Quando completa, esta camada (N) comporta até 32 elétrons, pois é formada pelos subníveis s, p, d e f.

4.2 Valência



Utilizando-se o mesmo exemplo dado anteriormente, percebe-se o nível mais externo do átomo

de arsênio (a camada N) com apenas 3 elétrons. Este nível é denominado nível de valência e os elétrons presentes nele são os elétrons de valência.

O número de elétrons de valência é um fator importante do elemento. Ele define a capacidade do átomo de ganhar ou perder elétrons e de se combinar com outros elementos. Muitas das propriedades químicas e elétricas dependem da valência.

4.3 Bandas de Energia

Quando os átomos não estão isolados, mas juntos em um material sólido, as forças de interação entre eles são significativas. Isso provoca uma alteração nos níveis de energia acima da valência. Podem existir níveis de energia não permitidos, logo acima da valência.

Para que um material conduza eletricidade, é necessário que os elétrons de valência, sob ação de um potencial elétrico aplicado, saltem do nível de valência para um nível ou banda de condução.

Conforme a figura ao lado, em um material condutor quase não existem níveis ou banda de energia proibidos entre a condução e a valência e, portanto, a corrente flui facilmente sob a ação do campo elétrico.

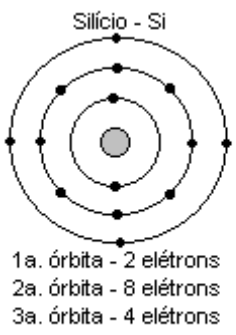
Um material isolante apresenta uma banda proibida de grande extensão entre a valência e condução. Pos isso, dificilmente há condução da corrente.

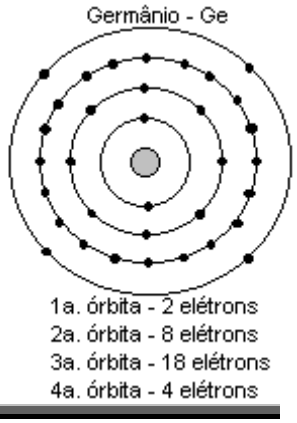
Os **semicondutores** possuem bandas proibidas com larguras intermediárias. Isso significa que podem apresentar alguma condução, melhor que a dos isolantes, mas pior que a dos condutores.

Os materiais semicondutores são sólidos ou líquidos, capazes de mudar com certa “facilidade” de sua condição de isolante para a de condutor. Isto é, podem sofrer grandes alterações em sua condutividade, pois a quantidade de energia necessária para retirar um elétron da banda de valência e levá-lo para a banda de condução é intermediária entre a energia necessária para o isolante e o condutor. Em baixas temperaturas, os semicondutores puros comportam-se como isolantes. Sob temperaturas mais altas, ou luz ou com a adição de impurezas, porém, pode ser aumentada drasticamente a sua condutividade, podendo-se alcançar níveis que se aproximam dos metais.

4.4 Materiais Intrínsecos

Na figura ao lado apresentam-se os átomos de dois materiais semicondutores intrínsecos ou puros, o silício (Si) e o germânio (Ge). Os semicondutores **intrínsecos** ou puros são aqueles encontrados em estado natural.



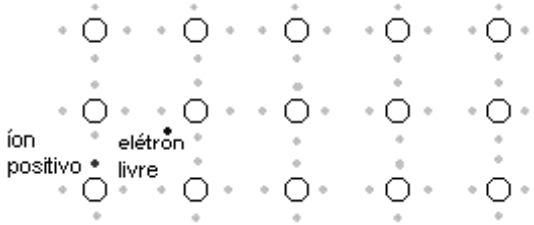


Ambos são elementos tetravalentes, ou seja, que possuem quatro elétrons na camada de valência, permitindo, assim, que os seus átomos façam quatro ligações covalentes ou de compartilhamento de elétrons, para tornarem-se estáveis.

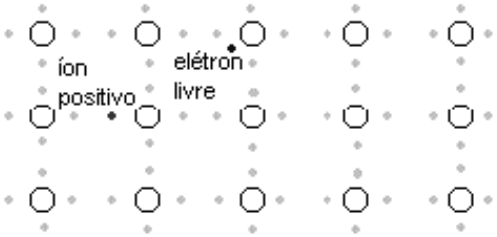
Existem, ainda, os semicondutores III-V que são formados por um elemento trivalente, o GaAs (Arseneto de Gálio) e por um elemento pentavalente, InP (Fosfeto de Índio). Porém, o material semicondutor intrínseco mais utilizado é o silício que é abundante na natureza, sendo encontrado nos cristais de quartzo (areia).

4.5 Condução Elétrica nos Semicondutores

Num determinado instante quando recebe um acréscimo de energia e sai da banda de valência, o elétron livre deixa em seu lugar uma lacuna. Esta lacuna é um íon positivo, conforme apresenta a figura seguinte:



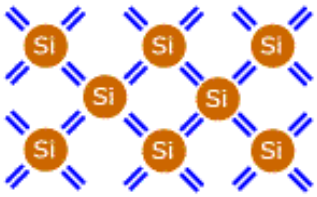
No instante seguinte, verifica-se que a lacuna também se move. Porém, a movimentação da lacuna ocorre sempre no sentido contrário à movimentação do elétron. Este fenômeno ocorre sempre que existe a condução elétrica no material semicondutor. Num material condutor o movimento das lacunas é desprezível.



4.6 Semicondutores do Tipo N e P

No estado puro, cada par de elétrons de átomos distintos forma a chamada ligação covalente, de modo que cada átomo fica no estado mais estável, isto é, com 8 elétrons na camada externa.

O resultado é uma estrutura cristalina homogênea conforme ilustrado na figura abaixo.

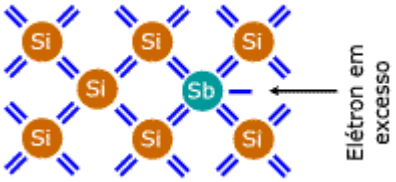


Representação Plana do Átomo de Silício

Para a maioria das aplicações não há elétrons livres suficientes num semicondutor intrínseco para produzir uma corrente elétrica utilizável. Portanto, para se obter esta corrente foram criados os semicondutores do tipo N e P.

Quando certas substâncias, denominadas impurezas, são adicionadas, as propriedades elétricas são radicalmente modificadas.

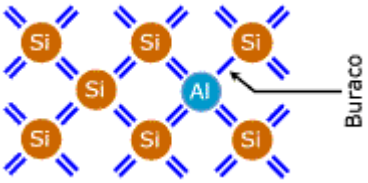
Se um elemento como o antimônio, que tem 5 elétrons de valência, for adicionado e alguns átomos deste substituírem o silício na estrutura cristalina, 4 dos 5 elétrons irão se comportar como se fossem os de valência do silício e o excedente será liberado para o nível de condução conforme mostra a figura seguinte.



O cristal irá conduzir e, devido à carga negativa dos portadores (elétrons), é denominado **semicondutor tipo N**.

Nota-se que o material continua eletricamente neutro, pois os átomos têm o mesmo número de prótons e elétrons. Apenas a distribuição de cargas muda, de forma a permitir a condução.

Agora imagine a situação inversa, conforme ilustrado abaixo: uma impureza com 3 elétrons de valência (alumínio, por exemplo) é adicionada.



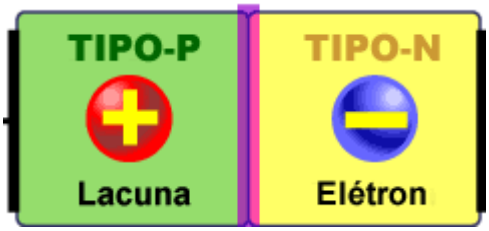
Alguns átomos de silício irão transferir um elétron de valência para completar a falta no átomo da impureza, criando um buraco (lacuna) positivamente carregado no nível de valência e o cristal será um **semicondutor tipo P**, devido à carga positiva dos portadores (buracos).

O processo de introduzir átomos de impurezas num cristal de silício, de modo a aumentar tanto o número de elétrons livres quanto de lacunas, chama-se **dopagem**. Quando um cristal de silício foi dopado, ele passa a ser chamado de **semicondutor extrínseco.**

4.7 Aplicações

4.7.1 Diodo Semicondutor

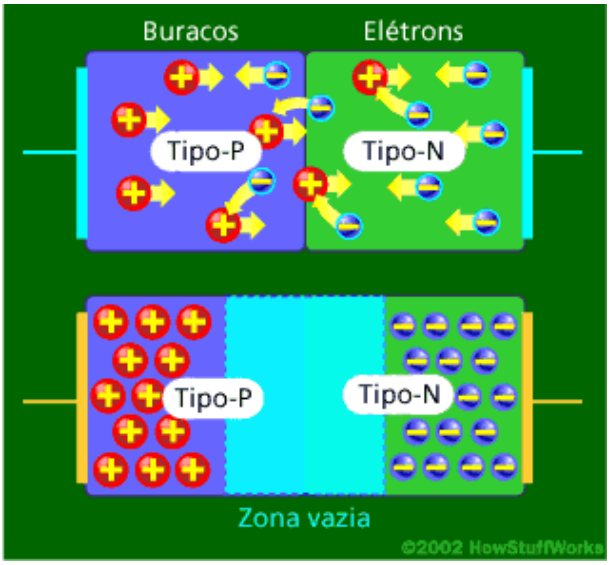
A união física de um semicondutor tipo P com um semicondutor tipo N forma uma **junção PN**, mostrada na figura ao lado. Esta junção PN recebe o nome de **diodo semicondutor**. Um diodo é composto por uma seção de material tipo-N ligado a uma seção de material tipo-P, com eletrodos em cada extremidade. Essa combinação conduz eletricidade apenas em um sentido.



Na formação da junção PN ocorre o processo de recombinação, no qual os elétrons do lado N, mais próximos da junção, migram para o lado P. Este processo ocorre até que haja o equilíbrio eletrônico e a estabilidade química, ou seja, 4 ligações covalentes em cada átomo.

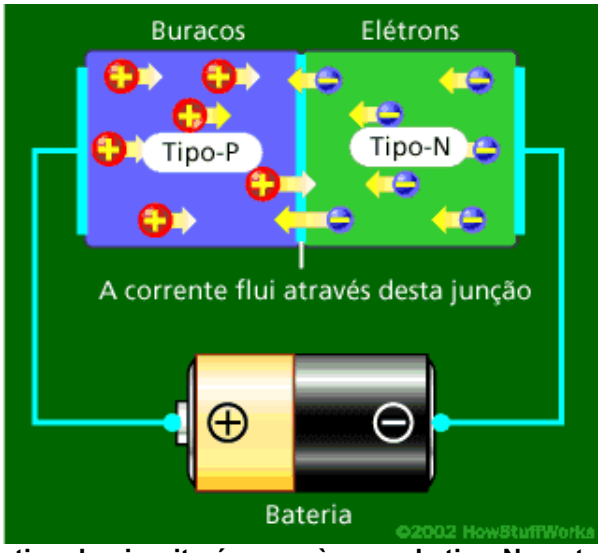
Durante o processo de recombinação forma-se, próximo à junção, a camada de depleção. Ao final deste processo, a camada de depleção fica ionizada formando a barreira de potencial ($V\gamma$) ou zona vazia. Isto ocorre quando nenhuma diferença de potencial é aplicada ao diodo, ou seja, os elétrons do material tipo-N preenchem os buracos do material tipo-P ao longo da junção entre as camadas.

Em uma zona vazia, o material semicondutor volta ao seu estado isolante original - todos os buracos estão preenchidos, de modo que não haja elétrons livres ou espaços vazios para elétrons, e assim a carga não pode fluir.



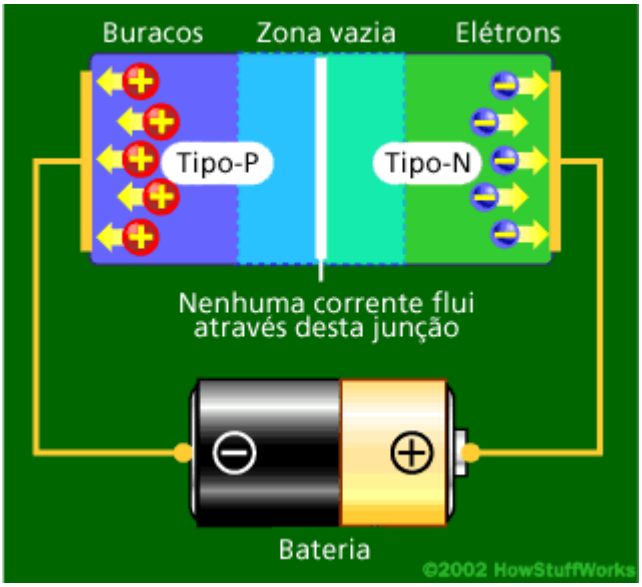
Na junção, elétrons livres do material tipo-N preenchem buracos do material tipo-P. Isto cria uma camada isolante no meio do diodo, chamada de zona vazia.

Para se livrar da zona vazia, é necessário que os elétrons se movam da área tipo-N para a área tipo-P e que buracos se movam no sentido inverso. Para fazer isto, conecta-se o lado tipo-N do diodo ao terminal negativo do circuito e o lado tipo-P ao terminal positivo. Desta forma, os elétrons livres no material tipo-N são repelidos pelo eletrodo negativo e atraídos para o eletrodo positivo. Os buracos no material tipo-P se movem no sentido contrário. Quando a diferença de potencial entre os eletrodos é alta o suficiente, os elétrons na zona vazia são retirados de seus buracos e começam a se mover livremente de novo. A zona vazia desaparece e a carga se move através do diodo. A figura a seguir ilustra este processo.



Quando o terminal negativo do circuito é preso à camada tipo-N e o terminal positivo é preso à camada tipo-P, elétrons e buracos começam a se mover e a zona vazia desaparece

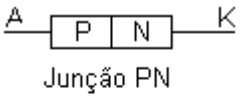
Caso a conexão da fonte seja no sentido oposto, com o lado tipo-P conectado ao terminal negativo do circuito e o lado tipo-N conectado ao pólo positivo, a corrente não fluirá. Os elétrons negativos no material tipo-N são atraídos para o eletrodo positivo. Os buracos positivos no material tipo-P são atraídos para o eletrodo negativo. Assim, nenhuma corrente fluirá através da junção porque os buracos e os elétrons estão cada um se movendo no sentido oposto, aumentando ainda mais a zona vazia (camada de depleção).



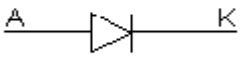
Quando o terminal positivo do circuito está ligado à camada tipo-N e o terminal negativo está ligado à camada tipo-P, elétrons livres são coletados em um terminal do diodo e os buracos são coletados em outro. A zona vazia se torna maior.

A ilustração a seguir apresenta o símbolo elétrico do diodo semicondutor e o componente eletrônico, propriamente dito. No lado P do diodo semicondutor conecta-se um terminal que recebe o nome de ânodo (A). Já no lado N, o terminal é denominado de cátodo (K).

No símbolo elétrico do diodo semicondutor o lado que tem o traço transversal, corresponde ao cátodo. Logo, o outro lado é o ânodo.



Junção PN

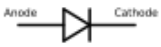


Símbolo Elétrico

Componente Eletrônico

No componente eletrônico o lado que contém o anel cinza, ou prateado, é o cátodo. Consequentemente, o outro lado é o ânodo.

Os diodos são projetados para assumir diferentes características: diodos retificadores são capazes de conduzir altas correntes elétricas em baixa freqüência, diodos de sinal caracterizam-se por retificar sinais de alta freqüência, diodos de chaveamento são indicados na condução de altas correntes em circuitos chaveados. Dependendo das características dos materiais e dopagem dos semicondutores há uma gama de dispositivos eletrônicos variantes do diodo:



Diodo

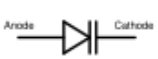
Diodo zener

Diodo Schottky

Diodo túnel

Diodo emissor de luz

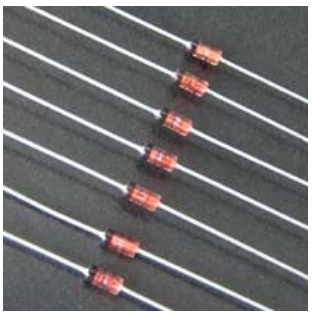
Fotodiodo



Varicap

SCR

DIODO ZENER



Diodo Zener é um tipo de diodo especialmente projetado para trabalhar na região de ruptura de tensão reversa da junção PN onde grandes variações de corrente produzem pequenas variações de tensões permitindo, desta forma, que se construa um regulador de tensão.

DIODO EMISSOR DE LUZ - LED

O LED (*Light Emitting Diode*) é um diodo semicondutor (junção P-N) que quando energizado emite luz visível. A luz é produzida pelas interações energéticas do elétron através de um processo chamado eletroluminescência. A recombinação de lacuna e elétron exige que a

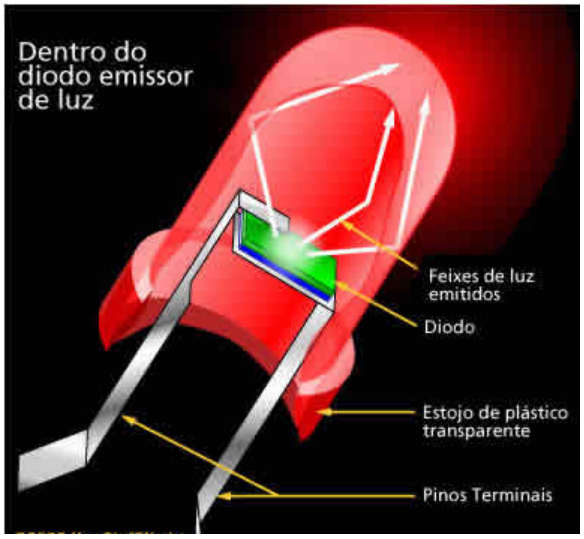
energia possuída pelo elétron, que até então era livre, seja liberada, o que ocorre na forma de calor ou fótons de luz.

No silício e no germânio, elementos básicos dos diodos e transistores, entre outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida (devido a opacidade do material), e os componentes que trabalham com maior capacidade de corrente chegam a precisar de irradiadores de calor (dissipadores) para ajudar na manutenção dessa temperatura em um patamar tolerável.

Já em outros materiais, como o arsenieto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons de luz emitido é suficiente para constituir fontes de luz bastante eficientes.

Em geral, os LEDS operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os LEDS infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5V, os vermelhos com 1,7V, os amarelos com 1,7V ou 2.0V, os verdes entre 2.0V e 3.0V, enquanto os LEDS azuis, violeta e ultravioleta geralmente precisam de mais de 3V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 horas, ou mais.

Enquanto todos os diodos liberam luz, a maioria não o faz muito eficientemente. Em um diodo comum, o próprio material semicondutor termina absorvendo parte da energia da luz. Os LEDs são fabricados especialmente para liberar um grande número de fótons para fora. Além disso, eles são montados em bulbos de plásticos que concentram a luz em uma direção específica. Como pode ser visto na figura ao lado, a maior parte da luz do diodo ricocheteia pelas laterais do bulbo, viajando na direção da ponta redonda.



Os LEDs têm muitas vantagens sobre lâmpadas incandescentes convencionais. Uma delas é que eles não têm um filamento que se queime e então durarão muito mais tempo. Além disso, seus pequenos bulbos de plástico os tornam muito mais duráveis. Eles também cabem mais facilmente nos modernos circuitos eletrônicos.

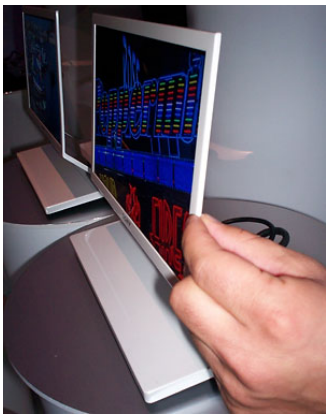
OLEDS (*Organic Light-Emitting Diode* ou Diodo Orgânico Emissor de Luz)

Uma tecnologia um pouco mais recente começa a chamar a atenção da indústria. Chamada OLED (*Organic Light-Emitting Diode* ou Diodo Orgânico Emissor de Luz) esta tecnologia promete suprir os grandes problemas atuais dos dispositivos de vídeo a um custo aceitável para o mercado de produtos de consumo.

O OLED tem basicamente a mesma estrutura dos LEDs mas diferem no tipo de material utilizado, apresentando em sua construção substâncias eletroluminescentes compostas de Carbono que, ao serem excitadas por uma corrente elétrica, emitem luz em uma freqüência determinada por sua composição química. Em outras palavras, são células de diodo impressas na tela que são polarizadas de acordo com a imagem.

Painéis de vídeo compostos por OLEDs podem ser extremamente finos (como uma folha de papel) e flexíveis (executados em materiais plásticos, como polímeros). Essa possibilidade surge do fato de que as substâncias químicas que compõe o OLED podem ser impressas em um filme plástico (como um documento é impresso em papel) para marcar os pixels. Ao colar outro filme plástico sobre a impressão cria-se pequenas capsulas que aprisionam cada pixel. A

aplicação de eletrodos minúsculos à cada célula permite que se leve à ela a corrente elétrica necessária para excitar cada uma das cores primárias que irão compor as imagens. Esta técnica permite a construção de monitores muito pequenos ou grandes, resistentes à água devido à sua natureza plástica, e flexíveis ou até mesmo dobráveis.



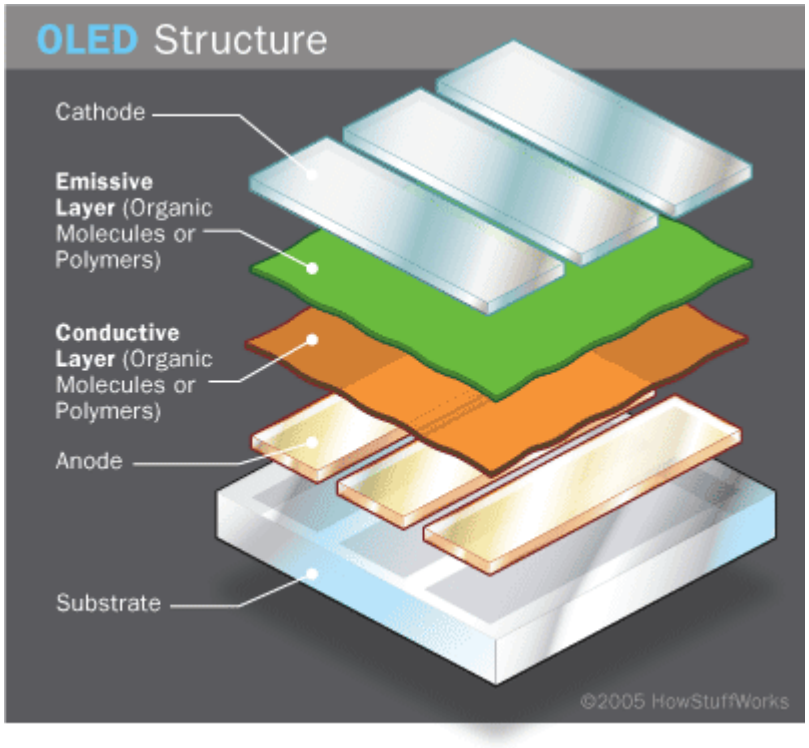
As primeiras aplicações de monitores OLED ocorreram em dispositivos móveis, como celulares, PDAs e até mesmo notebooks; onde a pequena espessura e o baixo peso da tela são mais importantes que outros fatores. Entretanto o preço de produção de monitores com essa tecnologia tem caído bastante e hoje já é possível construir telas OLED mais baratas e tão duráveis quanto telas LCD equivalentes. Além da simplicidade construtiva e das vantagens físicas os monitores OLED ainda superam seus rivais em vários aspectos técnicos. Monitores OLED são capazes de criar a cor preta, gerando o chamado “real black” e conseguem taxas de contraste 10 vezes maiores que monitores LCD produzidos atualmente. Não são susceptíveis ao efeito burn-out que agride monitores CRT e Plasma, situação onde a exibição prolongada de uma mesma imagem marca a tela de forma definitiva, fato ocorrido na maioria das telas de Plasma produzidas hoje em dia. Ainda que uma nova tecnologia de Plasma tenha sido desenvolvida para evitar o burn-out ela resulta em telas mais caras, razão que levou muitos fabricantes à ignorá-la. A rigor, ao comprar uma tela de Plasma, dificilmente será possível saber se aquele modelo específico é resistente ou não ao efeito danoso. Isso pode levar à desagradável situação de se observar, por exemplo, um pequeno símbolo da emissora no canto inferior direito da tela durante uma reprodução de DVD.

Além disto, o OLED dispensa iluminação de *background*, necessária nos LCDs, o que o torna a tecnologia mais econômica em termos de consumo de energia disponível atualmente. Ademais é uma excelente solução para dispositivos que operam com baterias já que atualmente a economia de energia é uma preocupação global. O OLED é capaz de reproduzir cores tão bem quanto o Plasma e apresentar um tempo de resposta muito menor que o do LCD. Tempo de resposta é o tempo que um pixel leva para acender, atingir a cor ideal e então apagar voltando ao estado de negro.

Entretanto alguns fatores continuam a atrasar a adoção em massa da nova tecnologia. Mesmo tendo custos de produção mais baixos que outras técnicas o OLED é relativamente recente. Muitas empresas que desenvolveram partes importantes da tecnologia, ainda cobram valores excessivamente altos pelas patentes e licenças de produção em busca de ressarcirem seus gastos em pesquisa e desenvolvimento. Além disso, os altos gastos na implementação das tecnologias atuais ainda não foram completamente amortizados. Muitos fabricantes não desejam tirar seus monitores LCD e Plasma de linha por entenderem que ainda há muito comércio com esses produtos antes que uma nova tecnologia possa ser levada ao mercado de massa. Entretanto a queda significativa nos preços dos monitores LCD e Plasma verificada em todos os

mercados é uma mostra de que, assim que essas tecnologias tornem-se o padrão, estará aberto o caminho para que outra possa ser implementada.

Mas o OLED ainda tem alguns detalhes a resolver antes que seja a tecnologia usada nas próximas gerações de televisores: A fragilidade dos filmes plásticos, que se rompidos inutilizam o monitor; A durabilidade dos compostos, especialmente os que reproduzem freqüências azuis. Entretanto parece claro que é o OLED a tecnologia que irá assumir o lugar do LCD e do Plasma no futuro, por unir as qualidades de ambos e ainda apresentar características que nenhuma delas pode reproduzir. A figura a seguir mostra a estrutura de um OLED.



4.7.2 Transistor de Junção Bipolar

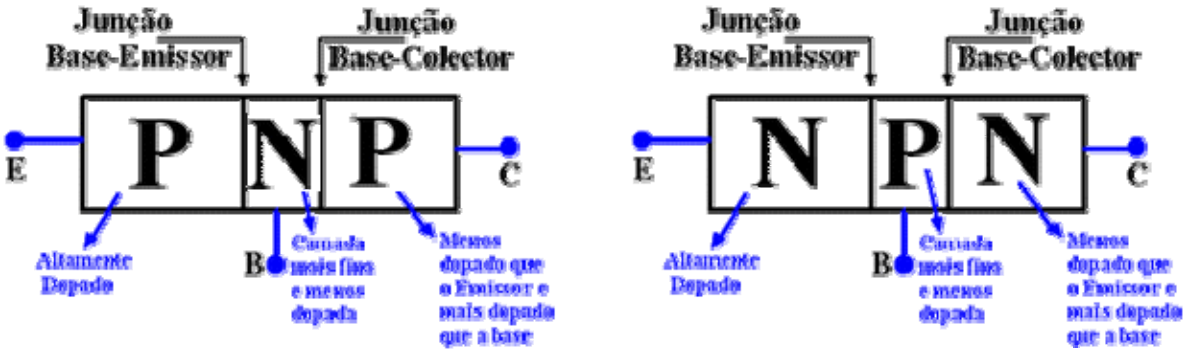
Uma combinação de tipos diferentes de semicondutores compõe o transistor, um dispositivo que pode ser empregado como uma válvula de triodo, substituindo-a em amplificadores e outros circuitos eletrônicos. E, admiravelmente, ao contrário da válvula, o transistor não consome energia (a válvula usa energia para aquecer seu catodo) e pode ser confeccionado em dimensões microscópicas, de maneira que centenas deles possam ser incorporados a um chip de sílica medindo apenas uns poucos milímetros.

O material semicondutor mais usado na fabricação de transistores é o silício. Contudo, o primeiro transistor foi fabricado em germânio. O silício é preferível, essencialmente, porque possibilita o funcionamento a temperaturas mais elevadas (175 ºC, quando comparado com os ~75ºC dos transistores de germânio) e também porque apresenta correntes de fuga menores.

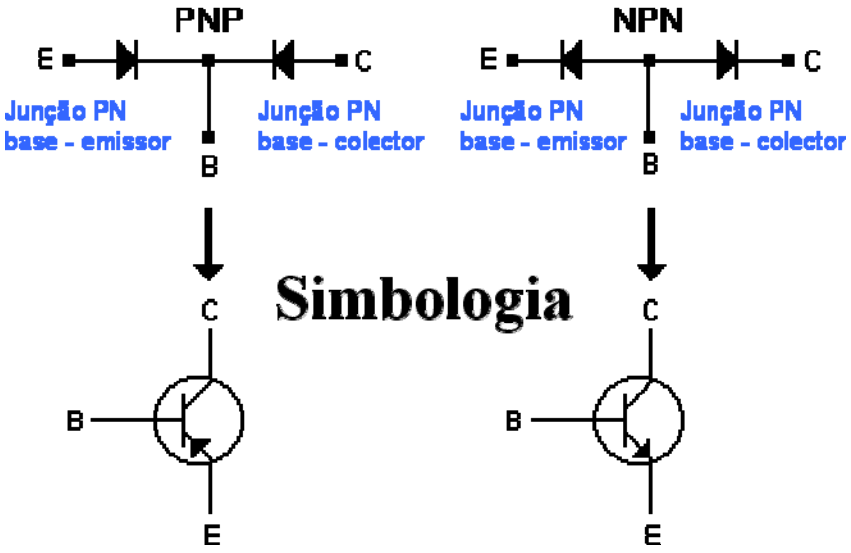
O transistor permite a amplificação e comutação de sinais, tendo substituído as válvulas termo-iônicas na maior parte das aplicações.

O transistor de junção bipolar é um dos componentes mais importantes na Eletrônica. É um dispositivo com três terminais, sendo possível usar a tensão entre dois dos terminais para

controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal, ou seja, obter uma fonte controlável. Este dispositivo é formado por duas junções PN em série, podendo apresentar as configurações PNP e NPN.

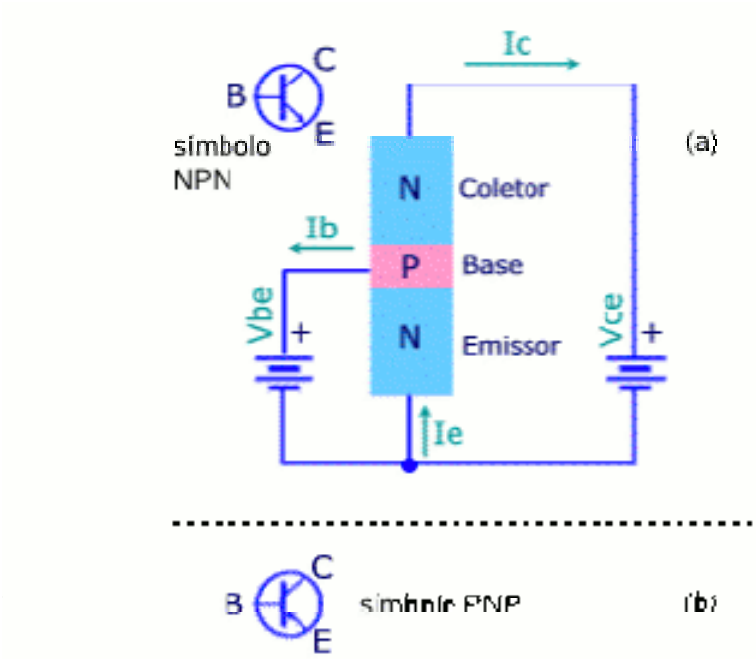


Os transistores NPN são os mais comuns, basicamente, porque a mobilidade dos elétrons é muito superior à das lacunas, isto é, os elétrons movem-se mais facilmente ao longo da estrutura cristalina, o que traz vantagens significativas no processamento de sinais de alta freqüência. E são, também, mais adequados à produção em massa. No entanto, deve-se salientar que, em várias situações, é muito útil ter os dois tipos de transistores num circuito.



A figura seguinte apresenta o transistor de junção bipolar NPN adequadamente polarizado e construído segundo alguns critérios, tendo a função de amplificador, onde:

- A junção base-emissor é polarizada diretamente pela fonte V_{be}.
- A junção base-coletor é polarizada inversamente pela fonte V_{ce}.
- V_{ce} é significativamente maior que V_{be}. Exemplo: 6V e 1V.



A base é fisicamente delgada e tem uma concentração de impurezas menor que os semicondutores N do emissor e coletor. Nessa forma, o fluxo de elétrons vindo do emissor tem pouca probabilidade de combinação com os buracos na junção da base para formar I_b e a maior parte rompe a polarização inversa da junção base-coletor devido ao campo elétrico maior de V_{ce}. Portanto, a polarização base-emissor atua como um acelerador do fluxo e controla a corrente I_c, fazendo o efeito da amplificação.

Pelo circuito, pode-se concluir que $I_e = I_b + I_c$.

Em componentes reais, I_b pode ser 5% (ou menos) de I_e e I_c pode ser 95% ou mais de I_e, ou seja, a amplificação é considerável.

Na parte esquerda superior da figura, é mostrado o símbolo normalmente usado para esse componente. Um parâmetro usual para o transistor é o **fator de corrente α**, que é a relação entre as correntes de coletor e emissor.

Assim, $\alpha = I_c/I_e$ ou $I_c = \alpha\ I_e$.

Como I_b é pequena, o fator α é próximo da unidade. E ocorre também:

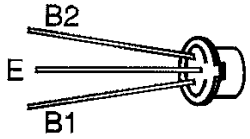
$$I_b = I_e - I_c = I_e - \alpha\ I_e = (1 - \alpha)\ I_e.$$

E o **ganho de corrente β,** característico do transistor, é dado por:

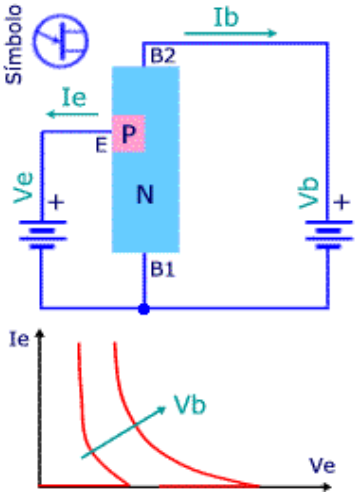
$$\beta = I_c/I_b = \alpha\ /\ (1 - \alpha).$$

No **transistor de junção PNP**, os tipos de semicondutores são invertidos em relação ao NPN (coletor e emissor são semicondutores tipo P e base é tipo N). A operação é similar, com inversão dos portadores de cargas e tensões de polarização de sinais contrários aos da figura anterior (a) e símbolo conforme (b) da mesma figura.

4.7.3 Transistor de Unijunção



Os transistores de unijunção ou UJT (*Unijunction Transistor*) podem ser utilizados em osciladores de baixa freqüência, disparadores, estabilizadores, geradores de sinais dente de serra e em sistemas temporizados.



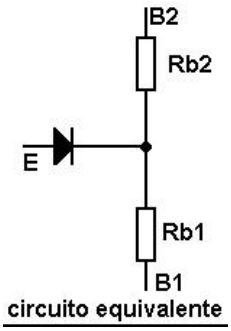
Basicamente o transistor de unijunção é constituído por uma barra de material semicondutor do tipo N (de alta resistividade) com dois contatos B_1 e B_2 extremos. Tais contactos não constituem junções semicondutoras, e assim, entre B2 (base 2) e B1 (base 1) temos, na prática uma resistência, formada pelo material semicondutor N. O material do tipo P como material do tipo N formam a única junção PN semicondutora interna.

Na altura da junção P haverá uma tensão na barra que dependerá da sua resistência ôhmica e de V_b.

Enquanto V_e for menor que essa tensão, a junção do emissor estará inversamente polarizada e, portanto, a corrente será nula.

Se V_e aumenta de forma que a junção fique diretamente polarizada, haverá um fluxo de portadores entre o emissor e base B_1 e a corrente aumenta mesmo que V_e diminua.

Isto dá ao dispositivo uma característica de resistência negativa, conforme indicado no gráfico da figura ao lado.

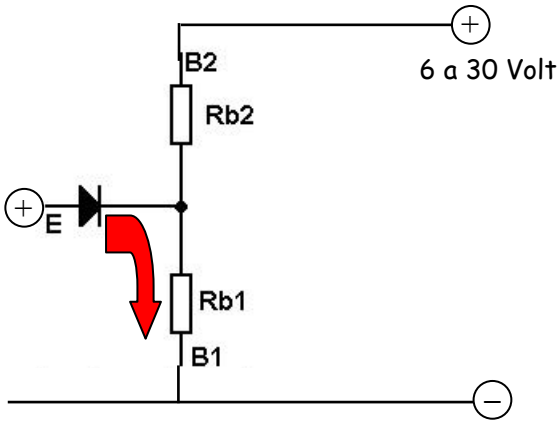


circuito equivalente

Tudo se passa como se o bloco do tipo N fosse formado por duas simples resistências (Rb2 e Rb1), em série, tendo ligado no seu ponto central um diodo (terminal E ou Emissor).

O terminal do emissor (E) está mais próximo da base 2 (B2), conforme o circuito equivalente apresentado ao lado.

<u>Princípio de Funcionamento:</u>



O valor resistivo normal entre os terminais da base 2 e 1 é relativamente alto (tipicamente entre 4 KΩ e 12 KΩ). Assim, se ligarmos o terminal B2 a um potencial positivo (tipicamente entre 6 e 30 Volt), e o terminal B1 ao negativo, uma corrente muito pequena circulará por Rb2 e Rb1. Ao mesmo tempo, Rb2 e Rb1 formam um divisor de tensão, em cujo ponto intermédio surge uma tensão menor, porém proporcional àquela que foi aplicada a B2. Suponhamos que Rb2 e Rb1 têm valores iguais, de 5 KΩ cada um. Assim, se aplicarmos (com a polaridade indicada) 10 Volt entre B2 e B1, o "cátodo" do "diodo" do emissor terá uma tensão de 5 Volts. Ao aplicarmos, então, uma tensão de entrada no emissor (E) do UJT, esta terá que, inicialmente vencer a barreira de potencial intrínseca da junção PN (0,6V) e, em seguida, superar a própria tensão que polariza o "cátodo" (5 Volts no

exemplo). Nesse caso, enquanto a tensão aplicada ao terminal do emissor (E) não atingir 5,6 Volts (0,6V + 5V) não haverá passagem de corrente pelo emissor através de Rb1 para a linha de negativo da alimentação. Mantendo-se, no exemplo, uma tensão de emissor igual ou maior do que 5,6 Volts haverá a passagem de uma corrente; já qualquer tensão inferior (a 5,6V) será incapaz de originar passagem da corrente elétrica pelo emissor (E) e por Rb1. Portanto, enquanto os 5,6V não forem atingidos, a corrente será nula, como através de um interruptor aberto. Alcançando os 5,6V, tudo se passa como se o interruptor estivesse fechado e, assim, a corrente que circulará estará limitada unicamente pelo valor resistivo intrínseco de Rb1.

Como a transição de corrente nula para corrente total, entre emissor (E) e base 1 (B1), se dá sempre de forma abrupta (quando a tensão de emissor chega à tensão/limite de disparo), podemos considerar o UJT como um simples interruptor acionado por tensão.

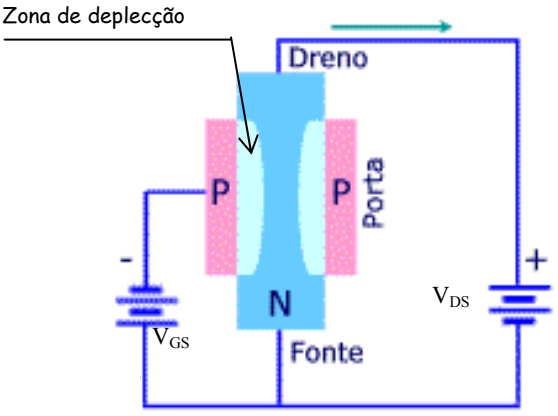
4.7.4 Transistor de Efeito de Campo

Os transistores bipolares e os transistores de efeito de campo distinguem-se pela sua estrutura e princípio de funcionamento; há, no entanto, uma diferença que determina a sua utilização: O transistor bipolar é comandado por corrente, enquanto o de efeito de campo é comandado por tensão.

Um **transistor de efeito de campo** (FET - *Junction Field Efect Transistor*) pode ser de dois tipos:

a) J-FET

O J-FET canal N é constituído basicamente por uma junção PN, sendo ambos os extremos da região N dotada de terminais (Dreno e Fonte), formando a região P (Gate ou porta) um anel em volta da região N.
Se ligarmos uma bateria entre os terminais da região N circulará uma corrente limitada apenas pela resistência do material semicondutor. Porém, se polarizarmos inversamente a junção PN (Gate negativa em relação à Fonte), formar-se-á uma zona de depleção em volta da junção PN. Devido a esse fato, ficará mais estreito o canal o que equivale a um aumento da resistência interna da região N.

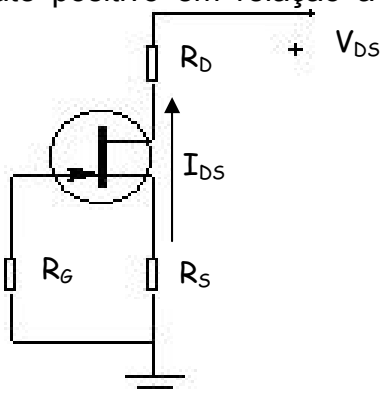


NOTA: Para o J-Fet canal P devemos inverter a polaridade das tensões aplicadas aos terminais.

Através da Gate podemos determinar o maior ou menor fluxo de corrente entre os terminais Fonte e Dreno. Fixando o valor da tensão dreno-fonte (V_{DS}), a corrente de dreno (I_D) será função da polarização inversa do Gate que variará a espessura do canal por variação da zona de depleção.

Princípio de Funcionamento:

Para o FET funcionar, o Gate deve ser inversamente polarizado (no J-FET canal N: Gate negativo em relação à Fonte, no J-FET canal P: gate positivo em relação à Fonte), o Dreno (D) é positivo em relação à Fonte (S). A corrente dreno-fonte (I_{DS}) ou simplesmente corrente de dreno (I_D) é inversamente proporcional à tensão gate-fonte (V_{GS}), conhecida por tensão de gate (V_G). Assim se: $V_G \uparrow \Rightarrow I_D \downarrow$ (isto porque a zona de depleção vai aumentar e o canal vai estreitar o que provoca um aumento de resistência e consequentemente uma diminuição da corrente)
Mantendo-se constante V_{DS} e fazendo variar V_G, I_D sofrerá uma certa variação e a relação $\Delta I_D/\Delta V_G$ dá-nos a transcondutância em Siemens do FET, representada por Gm.



J-Fet canal N

Considerando I_D como saída e V_{GS} como entrada, o J-FET surge como uma fonte de corrente controlada por tensão.

b) MOS-FET

Os transistores de gate isolada (Mos-FET ou Ig-FET) recebem esse nome em virtude da gate ser uma película metálica (de alumínio) isolada eletricamente do canal (semicondutor) através de uma finíssima camada de óxido de silício.
Um efeito semelhante ao anterior pode ser obtido com a porta totalmente isolada do canal. Este dispositivo, que usa uma camada de óxido para a isolação da porta, é denominado MOS-FET.
Deve-se evitar tocar com as mãos nos terminais dos FET já que todos eles, mas especialmente os de tecnologia MOS, são sensíveis a cargas elétricas estáticas, que podem danificar permanentemente a sua estrutura interna.
A sua resistência de entrada é muito elevada (da ordem dos $10^{15}\ \Omega$).

Tipos de MOS-FET:

1. de empobrecimento ou depleção

Tal como no J-FET um dos extremos do canal é a Fonte, e o outro o Dreno; e sobre o canal existe uma delicada capa de óxido de silício (SiO_2) sobre a qual é aplicada uma camada de alumínio (Al) para formar a Porta ou Gate.
O Dreno é ligado ao pólo positivo da bateria e a Fonte ao negativo. Se a tensão na Gate ou Porta for zero (VG= 0 Volt) a corrente de dreno (ID) será limitada apenas pela resistividade do canal n (que não é elevada). Porém, se aplicarmos uma tensão inversa entre o gate e a fonte (Gate negativo em relação à Fonte) forma-se um campo eletrostático que repelirá os elétrons livres que no material N são os portadores de corrente, formando-se,

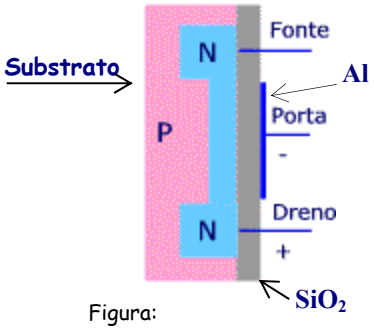
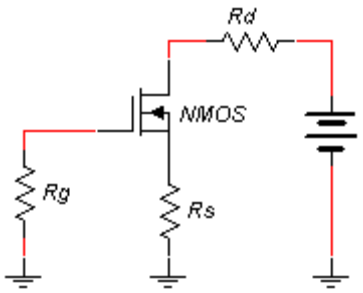


Figura:
NMOS de empobrecimento
Canal N – Substrato P

desta forma, uma zona de depleção, cuja profundidade dependerá da tensão aplicada.

Quando a tensão de porta se torna negativa o campo elétrico produzido pelo condensador (formado pela Porta – SiO_2 – canal N) vai atrair cargas positivas para o canal. A presença das cargas positivas atrai as negativas e isso produz um estreitamento do canal. Desta forma, tal como sucede nos J-FETs, a intensidade da corrente entre Fonte e Dreno (I_D) será inversamente proporcional à tensão entre Gate e Fonte (V_G) $V_G \uparrow \Rightarrow I_D \downarrow$



Há um valor da tensão de Gate, chamado tensão de corte, no qual o canal ficará totalmente fechado e a corrente de dreno será igual a zero. O menor valor negativo da tensão de Gate que elimina o canal designa-se por tensão limiar ou tensão de threshold (V_T) ou $V_{GS\,off}$.

Os Mos-FETs tipo depleção são semelhantes aos J-FET, tendo aplicações semelhantes, geralmente como amplificadores de sinais.

2. <u>de enriquecimento ou reforço</u>

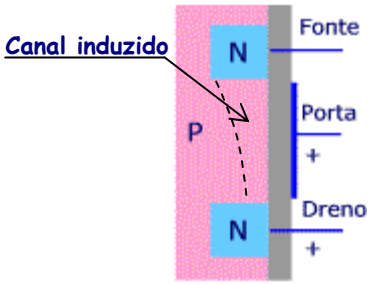
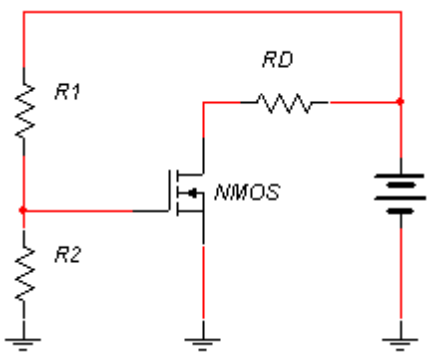


Figura:
NMOS de enriquecimento
Canal N – Substrato P

A zona P é mais larga, sendo o canal restrito a pequenas porções de material N junto à fonte e ao dreno. Tal como no FET de empobrecimento, o gate ou porta é isolado do canal por uma camada de óxido de silício. Neste transistor, no entanto, a porta ou gate recebe uma tensão positiva em relação à fonte, de modo que o campo eletrostático assim formado, em vez de repelir os elétrons, os atrai, formando um canal N entre a fonte e o dreno (o tracejado na figura). A formação deste canal permite, então, a circulação da corrente de dreno (I_D) cuja intensidade irá depender da tensão de gate (V_G), já que a profundidade do canal entre a Fonte e o Dreno será determinada pelo campo eletrostático.

Se a tensão gate – fonte (V_{GS}) for nula não se formará o canal induzido e logo não haverá corrente de dreno (I_D).



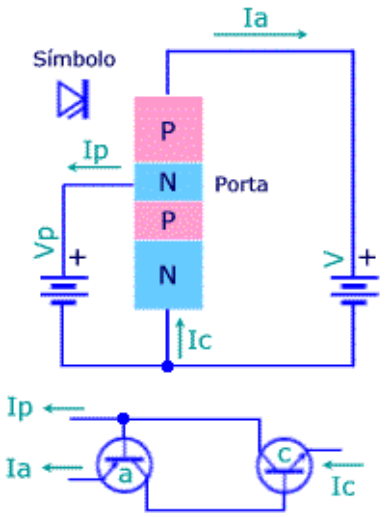
No caso do Mos-FET de canal N o dreno deve ser ligado ao positivo da bateria, e a Fonte ao negativo, sendo a gate ou porta ligada ao positivo através de um divisor de tensão destinado a fornecer a exata tensão de gate. É importante recordar que, como a resistência de entrada é infinita (já que o gate é eletricamente isolado do canal) o gate de um Mos-FET não consome qualquer corrente, daí a necessidade do divisor.

Os Mos-FETs tipo depleção são semelhantes aos J-FETs, tendo aplicações semelhantes como as de amplificadores de sinais.

4.7.6 Retificador controlado de silício

Um dispositivo com duas junções de silício PN, conforme ilustrado ao lado, é denominado **retificador controlado de silício** (sigla SCR - *Silicon Controled Rectifier*).

No circuito dado, as junções externas são polarizadas diretamente e a central, inversamente. Ele pode ser considerado como a combinação de um transistor NPN com um PNP.



Aplicando a lei de Kirchhoff:

$$I_c = \alpha_a I_a + \alpha_c I_c$$

Para todo o conjunto:

$$I_c = I_p + I_a$$

Resolvendo, $I_c = - \alpha_a I_p / (1 - \alpha_a - \alpha_c)$.

Se a soma dos fatores de corrente de ambos os transistores for próxima de 1, a corrente I_c será muito grande em relação a I_p, o que ocorre na prática. Os valores de I_p são realmente muito baixos e, uma vez iniciada a condução, I_p pode ser reduzido a zero, pois o dispositivo conserva a polarização, mantendo a condução.

Esses dispositivos são bastante utilizados no o controle de cargas de alta potência, como rotação de motores de corrente contínua, resistências de aquecimento, etc.

4.7.7 Termistores

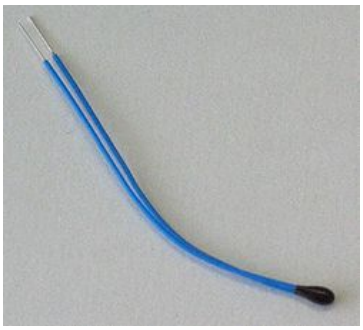
Termístor (ou termistor) são resistores semicondutores sensíveis à temperatura.

Existem basicamente dois tipos de termistores:

a) **NTC** (*Negative Temperature Coefficient*) - termistores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é negativo: a resistência diminui com o aumento da temperatura. Podem ser usados como sensores de temperatura em diversas aplicações com limitador de picos de corrente (*Inrush Current Limiting Devices*), por exemplo.

b) **PTC** (*Positive Temperature Coefficient*) - termistores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo: a resistência aumenta com o aumento da temperatura. Geralmente são usados como fusíveis “resetáveis”, elementos de aquecimento, sensores de temperatura.

Conforme a curva característica do termistor, o seu valor de resistência pode diminuir ou aumentar em maior ou menor grau em uma determinada faixa de temperatura.



Assim alguns podem servir de proteção contra sobreaquecimento, limitando a corrente elétrica quando determinada temperatura é ultrapassada. Outra aplicação, no caso a nível industrial, é a medição de temperatura (em motores, por exemplo),

pois o termistor possibilita a obtenção da variação de uma grandeza elétrica em função da temperatura em que este se encontra.

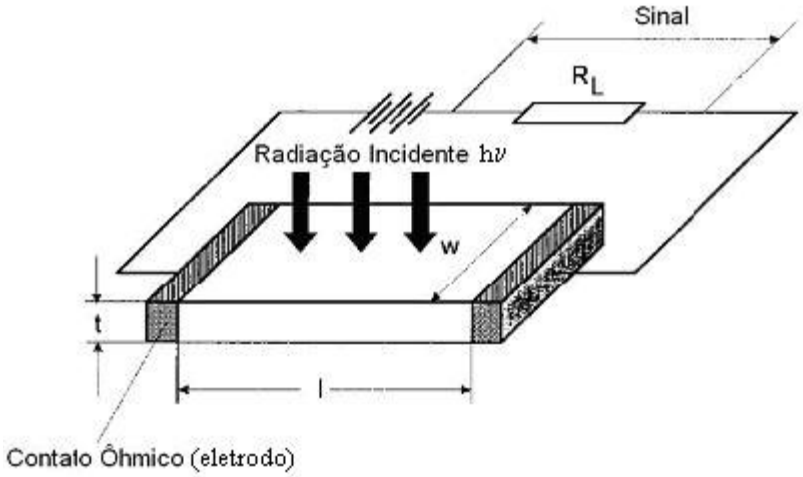
A combinação de sensibilidade, estabilidade e precisão faz do termistor a melhor relação custo x benefício dentre todas as tecnologias para medição de temperatura. É aplicado em:

ar condicionado
refrigeradores e freezers
desumidificadores
aquecedores de hidromassagem
equipamentos terapêuticos
chocadeiras
ar condicionado automotivo
cafeteiras
fornos/autoclave
fritadeiras
chuveiros
odontológicos
filtro de água
encubadeiras
termostatos eletrônicos
máquinas de fast food
gôndolas térmicas
equipamentos médicos
expositores
gerenciamentos de energia

4.7.8 Fotocondutores

O fotocondutor é, essencialmente, um componente semicondutor sensível à radiação, sendo a sua condutividade variável com a incidência de luz.

O esquema de operação de um fotocondutor pode ser visto na figura ao lado.



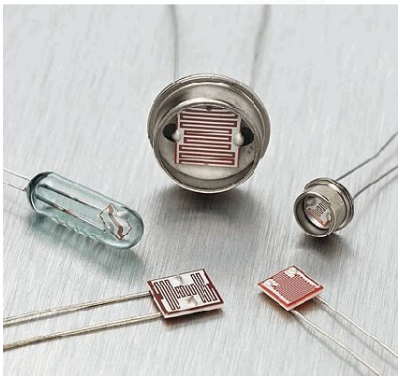
Um fóton de energia *hv* maior que o *gap* de energia da banda é absorvido para produzir um par elétron-lacuna, alterando conseqüentemente a condutividade elétrica do semicondutor. Quase sempre, a mudança na condutividade é medida por meio de eletrodos fixados no semicondutor.

Utilizam, geralmente, uma junção PN composta por dois semicondutores que são escolhidos em função das características que o detector deverá possuir.

O fotocondutor é, então, um outro resistor tipo NTC e um transdutor do tipo que converte energia luminosa na forma de energia elétrica. O exemplo de fotocondutor é o LDR (Light Dependent Resistor). Este possui a interessante característica de ser um componente eletrônico cuja resistência elétrica diminui quando sobre ele incide energia luminosa. Isto possibilita a utilização deste componente para desenvolver um sensor que é ativado (ou desativado) quando sobre ele incidir energia luminosa. É composto de um material semicondutor, o sulfeto de cádmio, CdS, ou o sulfeto de chumbo. O processo de construção de um LDR consiste na conexão do material fotossensível com os terminais, sendo que uma fina camada é simplesmente exposta à incidência luminosa externa. Com o LDR pode-se fazer o controle automático de porta, alarme contra ladrão, controle de iluminação em um recinto, contagem industrial, controle de iluminação pública, todos estes fotocontrolados para a operação de um relé.

Dispositivos fotocondutores comerciais são chamados de células fotocondutivas. São utilizados para medir a quantidade de iluminação (como um medidor de luz), para registrar uma modulação de intensidade luminosa e como um relé de luz liga-desliga (como um circuito digital ou de controle), neste caso, pode ser chamado de Relé-fotocélula, capaz de perceber a luz do sol, assim, identificando se é dia ou noite, acendendo

as lâmpadas automaticamente quando o dia escurece e desligando após o amanhecer, com grande aplicação em iluminação pública (figura ao lado).



O dispositivo fotocondutor de maior aplicação é a célula de sulfeto de cádmio dopada com uma pequena quantidade de prata, antimônio ou índio. As vantagens desses fotocondutores são:

- Alta capacidade de dissipação;
- Excelente sensibilidade no espectro visível;
- Baixa resistência quando estimulados pela luz (em escuridão, em torno de 2MΩ e, com luz forte, menos de 100Ω)

Podem então, controlar um circuito de vários Watts operando um relé diretamente, sem circuitos amplificadores intermediários.

Outros materiais fotocondutores:

- Sulfeto de chumbo, sendo usado para detecção ou medidas de absorção de infravermelho;
- Selenium, sensível em toda a parte do espectro visível, particularmente perto do azul.

Os fotocondutores são também usados utilizados em máquinas de xérox que funcionam da seguinte maneira:

1) Quando se inicia a operação de uma máquina de xerox, acende-se uma lâmpada, que "varre" todo o documento a ser copiado. A imagem é projetada por lentes e espelhos sobre a superfície de um cilindro fotossensível (de alumínio, revestido por material fotocondutor).
2) Uma imagem latente é formada na superfície do cilindro;
3) O cilindro recebe uma carga de material conhecido como toner ou tonalizador (tinta em pó) que é atraído pelas cargas que formam a imagem.
4) Transfere-se o toner para o papel, atrávés de cargas elétricas, e fixa-se o mesmo através de um processo que envolve calor e pressão.

Atualmente, no processo digital, a imagem latente é formada no cilindro através de raios laser ou diodos emissores de luz (LEDs), semelhante às impressoras à laser.

4.7.9 Células Fotovoltaicas

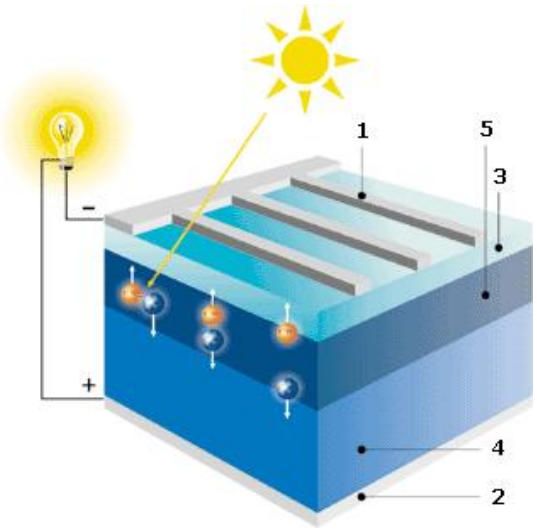
As Células Fotovoltaicas são muito usadas em residências rurais distantes de linhas de distribuição, pequenas calculadoras, relógios de pulso e aparelhos que precisam de pouca energia.

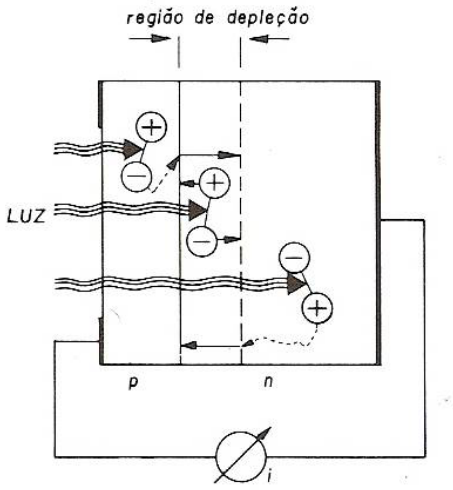
A célula fotovoltaica é construída de silício ao qual são adicionadas substâncias ditas dopantes de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência elétrica em corrente contínua (DC ou CC).

Composição e funcionamento de uma célula fotovoltaica cristalina:

1 – eletrodo negativo;

2 – eletrodo positivo;
3 – camada tipo N;
4 – camada tipo P;
5 – camada de limite (depleção)





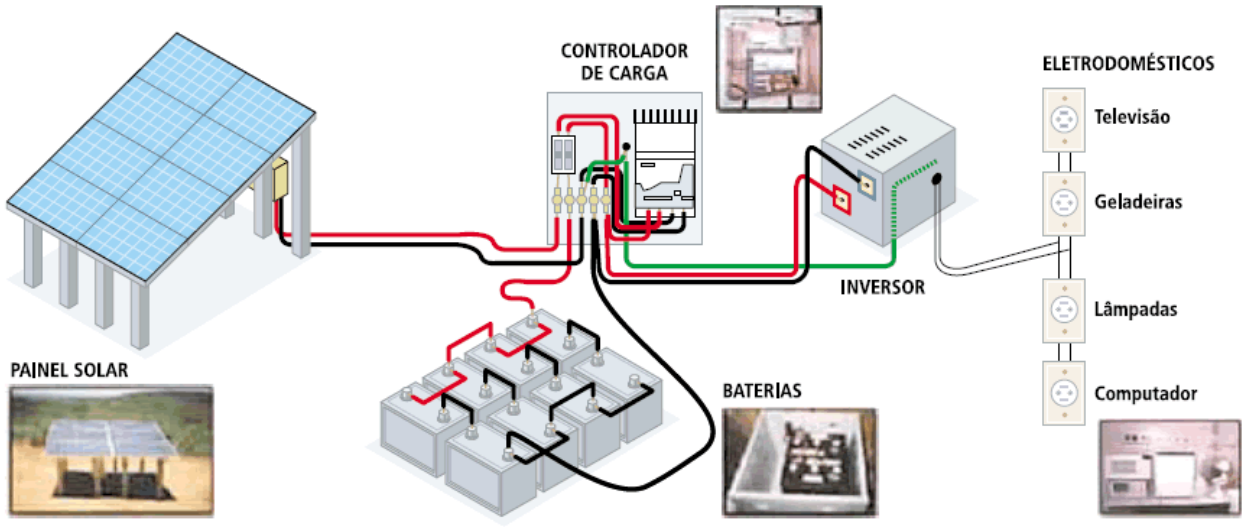
Quando os elétrons e lacunas atingem a junção PN, eles são separados pelo campo interno da região de depleção. O elemento fotovoltaico força a corrente a fluir no circuito externo, portanto, a energia luminosa é convertida em energia elétrica.

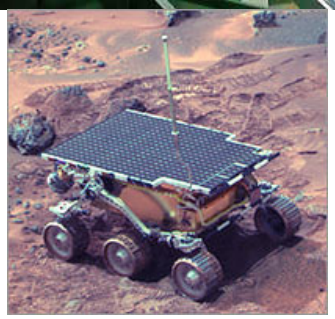
Em outras palavras, a célula solar trabalha segundo o princípio de que os fótons incidentes, colidindo com os átomos de certos materiais, provocam um deslocamento dos elétrons, carregados negativamente, gerando uma corrente elétrica. Este processo de conversão não depende do calor, pelo contrário, o rendimento da célula solar cai quando sua temperatura aumenta.

Deste modo, as células solares não só são apropriadas para regiões ensolaradas, mas também parecem promissoras para áreas em que outros tipos de sistemas de energia solar perecem sem perspectivas como as de baixa insolação. As células solares continuam a operar mesmo sob céu nublado.

A conversão da energia solar em energia elétrica, com o uso de painéis fotovoltaicos já é comercialmente viável para pequenas instalações. Seu uso é particularmente vantajoso em regiões remotas ou em zonas de difícil acesso. Os sistemas de comunicação, e, de modo geral, todos os equipamentos eletrônicos com baixo consumo de potência, podem ser facilmente alimentados por painéis fotovoltaicos. A figura abaixo mostra uma configuração típica de instalação do sistema fotovoltaico. Para sua utilização em residências se faz necessário o uso de alguns dispositivos tais como controlador de carga, baterias para armazenar a energia para uso noturno e um inversor para converter a tensão contínua e alternada.

Também torna-se especialmente notável a utilização de energia solar na alimentação de dispositivos eletrônicos existentes em foguetes, satélites e astronaves.

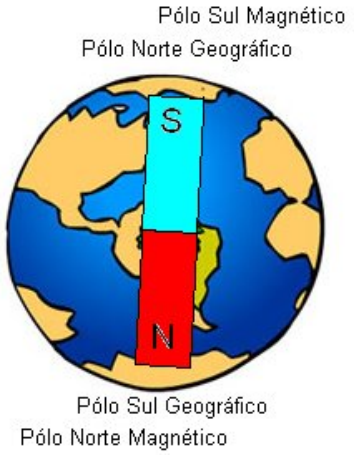

CONTROLADOR
DE CARGA
ELETRODOMÉSTICOS
Televisão
Geladeiras
Lâmpadas
Computador
INVERSOR
PAINEL SOLAR
BATERIAS



CAPÍTULO V

MATERIAIS MAGNETICOS

Os primeiros fenômenos magnéticos observados foram aqueles associados aos chamados “imãs naturais” (magnetos) que eram fragmentos grosseiros de ferro encontrados perto da antiga cidade de Magnésia, distrito de Thessally na Grécia (daí o termo “magneto”). Estes imãs tinham a propriedade de atrair ferro desmagnetizado, sendo que esta propriedade era mais acentuada em certas regiões deste material denominadas pólos.



Existem dois tipos de imãs:

- **Imãs Naturais** – são aqueles que encontramos na natureza e são compostos por minério de ferro (óxido de ferro). Este tipo de ferro magnético é denominado magnetita.
- **Imãs Artificiais** – são aqueles que adquirem propriedade magnética ao serem atritados com um imã natural. A capacidade magnética destes imãs pode superar a dos imãs naturais.

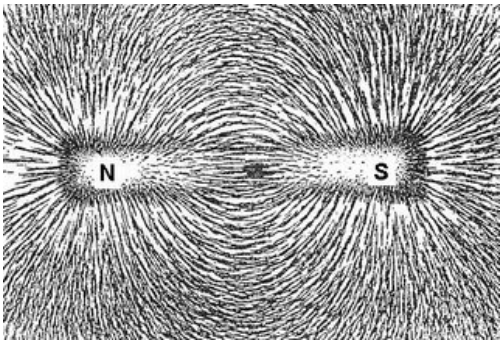
Os imãs possuem dois pólos (norte - N e sul - S). O pólo sul de um imã é atraído pelo pólo norte do Planeta Terra e vice-versa.

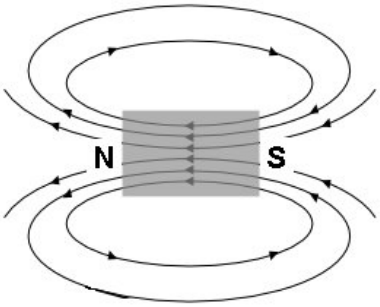
Descobriu-se então que, quando uma barra de ferro era colocada perto de um imã natural ela adquiria e retinha esta propriedade do imã natural e que, quando suspensa livremente em torno de um eixo vertical, ela alinhava com a direção norte-sul, que originou os instrumentos de navegação como, por exemplo, a bússola.

A força que atrai o ferro, ou outros metais, a um ímã é chamada l**inha de força**.

Um conjunto de linhas de força que saem do pólo N e entram no imã pelo S forma o **campo magnético**.

Ao espalharmos limalha de ferro sobre um ímã pode-se perceber a forma do campo magnético por meio das linhas de indução, este fato está ilustrado na figura abaixo.





Quanto mais forte o imã:

- Maior o número de linhas de força;
- Maior a área abrangida pelo campo magnético.

O magnetismo ou força magnética é fundamental na geração e aproveitamento da corrente elétrica. Todo tipo de sistema ou

equipamento eletromecânico contem efeitos magnéticos em seus circuitos. Desta forma, a existência de equipamentos como motores, geradores, transformadores, indutores, instrumentos elétricos, medidores, componentes magnéticos, etc. seria impossível se os fenômenos magnéticos não fossem compreendidos e dominados.

Hoje em dia, pesquisas são feitas para se desenvolver outros tipos de materiais que tenham essa propriedade ainda mais acentuada e que possam ser manipulados de maneira a permitir novas configurações e formatos de núcleos reduzindo-se assim as perdas destes núcleos, bem como seus tamanhos.

Os materiais magnéticos mais importantes em aplicações elétricas gerais são chamados ferromagnéticos. Estes permitem o estabelecimento de fenômenos magnéticos devido à sua característica de conectar linhas de força magnética, sofrendo atração por estas forças. O exemplo mais antigo deste material é a magnetita (O_4Fe_3). Este e outros tipos de materiais magnéticos serão estudados a seguir.

5.1 Classificação dos Materiais Magnéticos

Os materiais magnéticos podem ser classificados conforme os **domínios magnéticos**. Estes correspondem à menor unidade de um material que se caracteriza por possuir uma única orientação magnética, isto é, um vetor campo magnético próprio.

Em um material magnético, os domínios podem estar orientados ao acaso de modo que seus momentos magnéticos se anulam.

Ao aplicarmos um campo magnético externo, os domínios se alinham na direção deste campo e podem permanecer ou não alinhados depois de retirarmos o campo.

Sob esta análise os materiais magnéticos podem ser:

- **Duros:** São aqueles que ao retirarmos o campo magnético externo, o alinhamento dos domínios permanece. Também chamados ímãs.
- **Moles, macios ou doces:** o alinhamento dos domínios desaparece ao retirarmos o campo magnético externo.

Algumas aplicações exigem materiais duros e outras aplicações exigem materiais moles. Um ímã de geladeira, por exemplo, deve ser feito de um material magnético duro, para que possa permanecer imantado por muito tempo. Já os motores elétricos exigem materiais magnéticos moles, para que eles possam se adaptar rapidamente às alterações da corrente elétrica alternada.

Por outro lado, fisicamente, os materiais magnéticos podem ser classificados, quanto à permeabilidade, como:

- **Ferromagnéticos (ferro, níquel, cobalto, aço) –** caracterizam-se por uma magnetização espontânea, que é totalmente independente de campos magnéticos externos. A grandeza desta magnetização depende da temperatura que, quando crítica (Temperatura de Curie - variável para cada material. Exemplo: ferro 770^0C, cobalto 770^0C, níquel 365^0C) o material perde suas propriedades magnéticas passando de ferromagnético para diamagnético. Os ferromagnéticos possuem uma permeabilidade magnética (μ) centenas ou milhares de vezes, maior que a do vácuo (μ_o), onde $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m. Estes materiais provocam uma forte

concentração das linhas de fluxo do campo que os interceptam. Na seqüência, são apresentadas a permeabilidade magnética de alguns materiais:

Cobalto, $\mu_r = 60$

Níquel, $\mu_r = 50$

Ferro fundido, $\mu_r = 30$ a 800

Aço, $\mu_r = 500$ a 5000

Ferro de transformador, $\mu_r = 5500$

Ferro puro, $\mu_r = 8.000$

Metal um (76Ni + 1,5Cr + 4Cu + Fe), $\mu_r = 100.000$

- **Diamagnéticos (vidro, água, antimônio, bismuto, chumbo, cobre, gases raros)** Estes materiais afastam ligeiramente as linhas de fluxo que os interceptam. A direção do campo adicional (formado através da teoria dos domínios) é oposta à do campo externo fazendo com que o campo resultante seja menor que o campo externo. Sua permeabilidade magnética é menor que a do vácuo. Por exemplo:

Ouro, $\mu_r = 1 - 35 \times 10^{-6}$

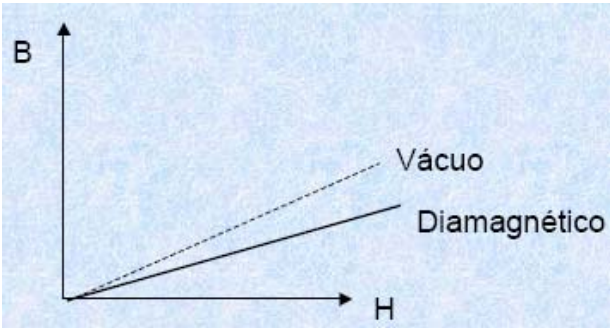
Mercúrio, $\mu_r = 1 - 12 \times 10^{-6}$

Prata, $\mu_r = 1 - 20 \times 10^{-6}$

Água, $\mu_r = 1 - 175 \times 10^{-6}$

Zinco, $\mu_r = 1 - 10 \times 10^{-6}$

Bismuto, $\mu_r = 0{,}9999986$



O bismuto apresenta uma variação em sua resistência elétrica quando atravessado pelo fluxo magnético, sendo por isso aproveitado em instrumentos de medição de campo magnético.

- **Paramagnéticos (oxigênio, sódio, sais de ferro e de níquel, alumínio, silício) –** Estes materiais tendem a concentrar ligeiramente as linhas de fluxo que os interceptam. A direção do campo adicional é a mesma do campo externo, portanto, o campo resultante é maior que o campo externo. Sua permeabilidade magnética é ligeiramente maior que a do vácuo. Por exemplo:

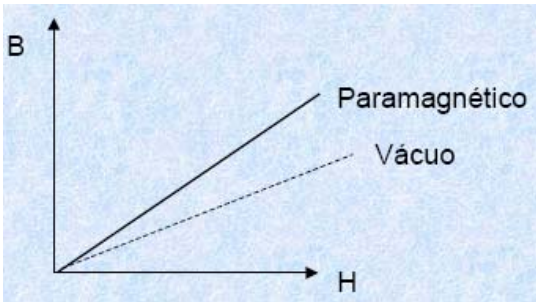
Alumínio, $\mu_r = 1 + 22 \times 10^{-6}$

Paladium, $\mu_r = 1 + 690 \times 10^{-6}$

Platina, $\mu_r = 1 + 330 \times 10^{-6}$

Oxigênio, $\mu_r = 1 + 1{,}5 \times 10^{-6}$

Berílio, $\mu_r = 1{,}000000079$



5.2 Características dos Materiais Magnéticos

5.2.1 Retentividade

É a maior ou menor capacidade de um material reter o magnetismo. O aço, por exemplo, possui maior retentividade do que o ferro doce.

5.2.2 Relutância

É a oposição ao estabelecimento do fluxo no circuito magnético. Apenas como referência pode-se pensar na resistência e sua oposição à passagem de corrente elétrica e será possível estabelecer uma analogia. A Relutância pode ser obtida a partir das características magnéticas e geométricas do material, conforme mostrado na equação abaixo:

$$\Re = \frac{l}{\mu \times A}$$

Onde:

$\Re$: relutância, em henry^{-1};

L: comprimento do material, m;

A: área da seção reta, m^2;

μ: permeabilidade do material, henry/m.

5.2.3 Permeância

É a recíproca da relutância (análogo à condutância).

5.2.4 Permeabilidade

É a característica do material quanto à maior ou menor facilidade de se deixar atravessar pelo fluxo magnético circulante, opondo-se em maior ou menor grau à orientação das moléculas. A permeabilidade é função da temperatura e da intensidade de campo magnético aplicado.

5.2.5 Permeabilidade Relativa

A permeabilidade do vácuo é dada por: $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m

A permeabilidade dos demais materiais geralmente é referenciada à permeabilidade do vácuo, no que é chamada de "permeabilidade relativa", dada por:

$$\mu = \mu_o \times \mu_r$$

Onde:

μ: permeabilidade do material, H/m;

μ_o: permeabilidade do vácuo, H/m;

μ_r: permeabilidade relativa do material, adimensional.

A permeabilidade do ar é normalmente considerada como a permeabilidade do vácuo.

5.2.6 Meios de Propagação do Fluxo Magnético

- **Material não saturável**: materiais onde $\mu = \mu_o$ = cte -> $\mu_r = 1$;
  - Material diamagnético;
  - Material paramagnético

- **Material Saturável**: qualquer material ferromagnético. $\mu >> \mu_o$ -> $\mu_r >> 1$.

5.2.7 Intensidade de Campo Magnético

É a relação entre a densidade de fluxo no material e sua permeabilidade. É dado por:

$$B = \mu \times H$$

Onde:

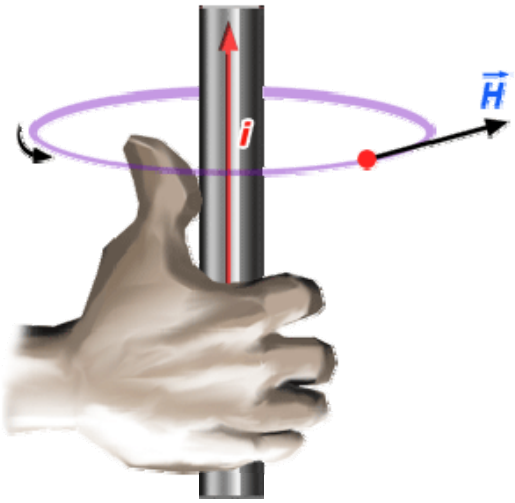
B: densidade de fluxo, Wb/m^2;

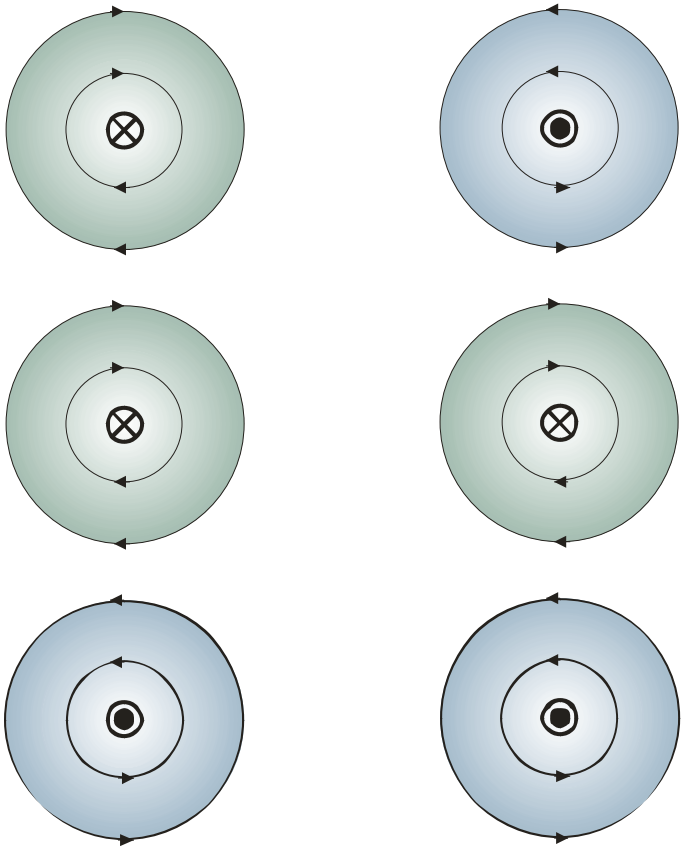
H: intensidade de campo magnético, ampére/metro, A/m;

μ: permeabilidade do material, H/m.

Quando um condutor conduz uma corrente elétrica um campo magnético é produzido a sua volta, como ilustrado ao lado.

A direção das linhas de fluxo ou a intensidade (H) do campo magnético pode ser determinada pela regra da mão direita. Se o condutor é retilíneo, imagine o polegar da mão direita, esticado e apontando no sentido da corrente, e os outros quatro dedos fechados sobre o condutor. Então estes quatro dedos apontam o sentido do campo como ilustrado na figura ao lado.





Adição e Subtração de Campo Magnético:

⊙ corrente saindo do condutor

⊗ corrente entrando no condutor

1ª ilustração: adição

Por terem o mesmo sentido formam um campo total mais forte.

2ª e 3ª ilustrações: subtração

Por terem o sentidos contrários formam um campo total mais fraco.

5.2.8 Densidade de Fluxo

É a relação entre o fluxo, expresso em weber, Wb, e a área da seção reta, em m^2, atravessada por este fluxo, expressa pela equação abaixo:

Onde:

$$B = \frac{\phi}{A}$$

B: densidade de fluxo magnético, Wb/m^2;

Ø: fluxo magnético, Wb;

A: área da seção reta, m^2.

5.2.9 Força Magnetomotriz

Um solenóide ou um eletroímã pode ser feito a partir de um núcleo de ar ou material magnético e um enrolamento ou conjunto de espiras, normalmente sobre uma forma, através das quais faz-se passar uma corrente. A passagem de corrente cria um campo magnético, que pode ser concentrado caso o núcleo seja de material magnético. A força magnetomotriz é obtida por:

Onde:

$$f_{mm} = N \times I$$

f_{mm}: força magneto motriz, ampére – espiras;

N: número de espiras do enrolamento;

I: corrente que percorre o enrolamento, ampéres.

A relutância pode ser então definida à partir de :

Onde:

$$f_{mm} = \phi \times \Re$$

f_{mm}: força ,magneto motriz, ampére-espiras;

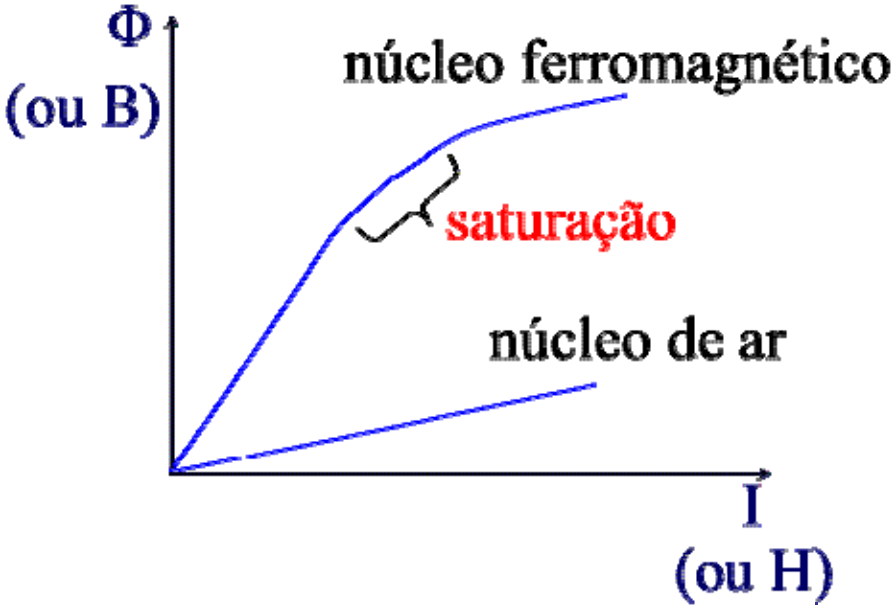
Φ: fluxo magnético, Wb;

ℜ: relutância, A / Wb ou H^{-1}.

5.2.10 Curva de Magnetização (BxH)

A curva de magnetização é um gráfico, obtido experimentalmente, que relaciona a indução magnética B com a intensidade do campo magnético ou excitação magnética H. O gráfico pode também relacionar o fluxo magnético Φ com a corrente de excitação I.

Considerando uma bobina com núcleo de ar, o aumento da corrente elétrica na bobina (e, consequentemente, a excitação magnética H) provoca um aumento do fluxo magnético Φ (e, consequentemente, a indução magnética B). A relação entre Φ e I é linear, ou seja, o aumento de Φ é diretamente proporcional ao aumento de I.



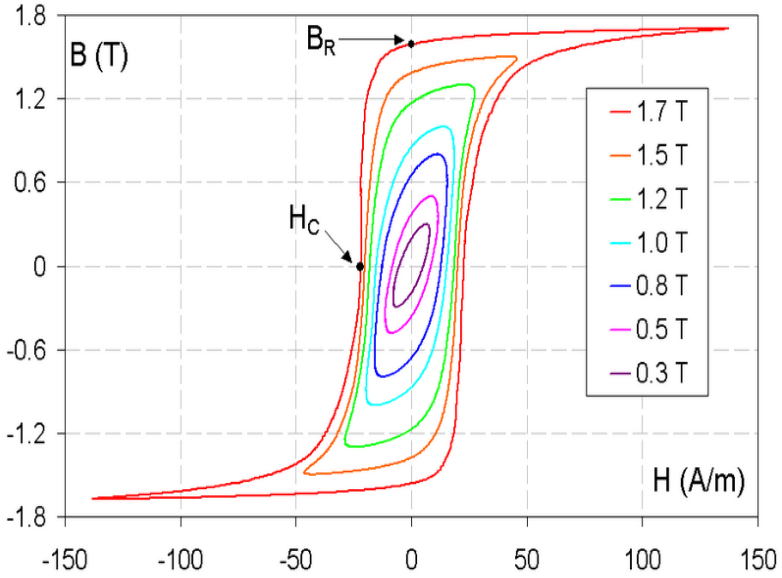
Introduzindo um núcleo de material ferromagnético no interior da bobina, o fluxo magnético toma valores muito maiores que com núcleo de ar, para os mesmos valores da corrente I. Este grande aumento do fluxo em relação à bobina com núcleo de ar deve-se à contribuição dada pelos átomos que são, na realidade, pequenos ímãs. Estes átomos, inicialmente desordenados, alinham-se segundo as linhas de força do campo magnético produzido pela corrente. Ao alinhar-se, o fluxo que possuem soma-se ao fluxo inicial. Quanto maior for o valor da corrente, maior é o número de átomos que se alinham e maior o valor do fluxo total. À medida que a corrente aumenta, o número de átomos que resta por alinhar é cada vez menor e, por isso, o fluxo não aumenta mais proporcionalmente à corrente. Portanto, após o aumento inicial linear do fluxo, entra-se na chamada zona de saturação. Quando todos os átomos estiverem alinhados, o aumento do fluxo com a corrente volta a ser linear (mas pequeno, tão pequeno quanto era com a bobina com núcleo de ar), dependendo apenas do valor da corrente. A partir do ponto de saturação, a linha do gráfico fica, então, paralela à linha correspondente à bobina com núcleo de ar.

5.2.11 Laço de Histerese

Quando o campo magnético aplicado em um material for aumentado até a saturação e em seguida for diminuído, a densidade de fluxo B não diminui tão rapidamente quanto o campo H. Desta forma, quando H chega a zero, ainda existe uma densidade de fluxo remanescente, Br. Para que B chegue a zero, é necessário aplicar um campo negativo, chamado de **força coercitiva**.

Se H continuar aumentando no sentido negativo, o material é magnetizado com polaridade oposta. Desse modo, a magnetização inicialmente será fácil, até quando se aproxima da saturação, passando a ser difícil. A redução do campo novamente a zero deixa uma densidade de fluxo remanescente, -Br, e, para reduzir B a zero, deve-se aplicar uma força coercitiva no sentido positivo. Aumentando-se mais ainda o campo, o material fica novamente saturado, com a polaridade inicial.

Este fenômeno que causa o atraso entre densidade de fluxo e campo magnético é chamado de **histerese magnética** que é tanto maior quanto mais forte for a oposição apresentada pelo material ferromagnético. O ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de **ciclo ou laço de histerese**.



Uma família de curvas de histerese medida com uma densidade de fluxo modulada senoidalmente com freqüência de 50 Hz e campo magnético variável de 0,3 T a 1,7 T.

Onde:
B = Densidade de fluxo magnético

H = Campo magnético

B_R = valor da densidade magnética residual; é a densidade de fluxo que permanece quando a força magnetizante (H) é retirada

H_C = força coercitiva = é o valor da força magnetizante necessária para anular o magnetismo residual.

Quando o ferro não está magnetizado, seus domínios magnéticos estão dispostos de maneira aleatória. Porém, ao aplicar uma força magnetizante, os domínios se alinham com o campo aplicado. Se invertermos o sentido do campo, os domínios também inverterão sua orientação. Num transformador, o campo magnético muda de sentido muitas vezes por segundo, de acordo com o sinal alternado aplicado. E o mesmo ocorre com os domínios do material do núcleo. Ao inverter sua orientação, os domínios precisam superar o atrito e a inércia. Ao fazer isto, dissipam certa quantidade de potência na forma de calor, que é chamada de **perda por histerese**.

Em determinados materiais, a perda por histerese é muito grande. O ferro doce é um exemplo. Já no aço, esse tipo de perda é menor. Por isto, alguns transformadores de grande potência utilizam um tipo de liga especial de Ferro-silício, que apresenta uma perda por histerese reduzida. Este tipo de problema também aumenta junto com a freqüência do sinal. Um transformador que apresenta baixa perda nas freqüências menores pode ter uma grande perda por histerese ao ser usado com sinais de freqüências mais altas.

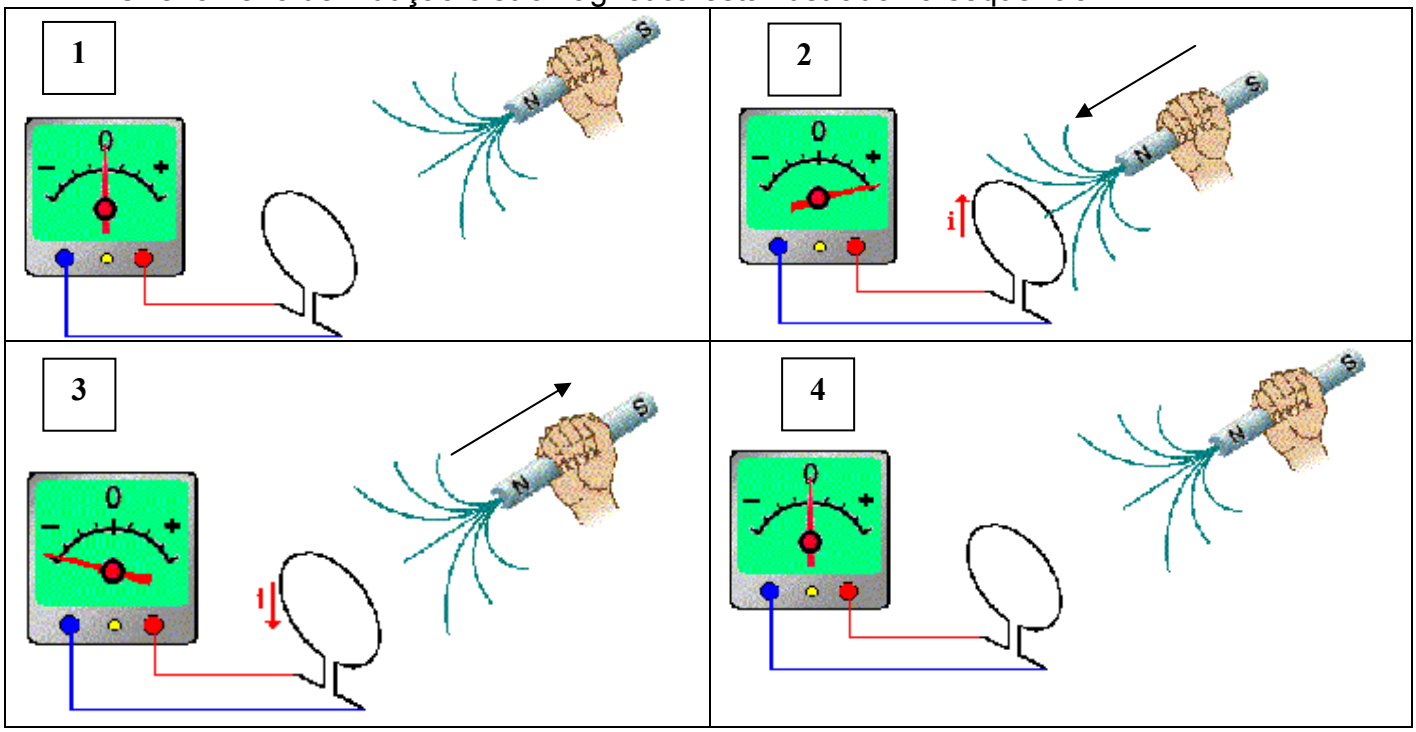
A histerese é produzida devido ao gasto de energia para inverter os dipolos durante uma mudança de campo eletromagnético.

5.3 Lei de Faraday e Lei de Lenz

Michael Faraday, baseando-se nos trabalhos de Hans Christian Oersted e André-Marie Ampère, em meados de 1831, começou a investigar o efeito inverso do fenômeno por eles estudado, onde campos magnéticos produziam correntes elétricas em circuitos.

Faraday descobriu que um campo magnético estacionário próximo a uma bobina, também estacionária e ligada a um galvanômetro não acusa a passagem de corrente elétrica. Observou, porém, que uma corrente elétrica temporária era registrada no galvanômetro quando o campo magnético sofria uma variação. Este efeito de produção de uma corrente em um circuito, causado pela presença de um campo magnético, é chamado de indução eletromagnética e a corrente elétrica que aparece é denominada de corrente induzida.

O fenômeno de indução eletromagnética está ilustrado na seqüência.



Nas ilustrações, observa-se que a fem induzida produz uma corrente cujo sentido cria um campo magnético que se opõe a variação do fluxo magnético original. Este fenômeno é conhecido como **lei de Lenz**.

A lei de Lenz é a garantia de que a energia do sistema se conserva. Isto significa que a direção da corrente induzida tem que ser tal que se oponha as mudanças ocorridas no sistema. Caso contrário, a lei de conservação de energia seria violada.

Existem vários modos de se obterer correntes induzidas em um circuito, os quais são enumeradas a seguir:

- O circuito pode ser rígido e, no entanto, pode mover-se como um todo em relação a um campo magnético, de modo que o fluxo magnético através da área do circuito varia no decorrer do tempo.
- Sendo o campo B estacionário, o circuito pode ser deformável de tal modo que o fluxo de B através do circuito varie no tempo.

- O circuito pode ser estacionário e indeformável, mas o campo magnético B, dirigido para a superfície é variável no tempo.

Em resumo, em todos os três casos, verifica-se que o ponto chave da questão está na variação do fluxo magnético com o tempo. Isto se dΦ/dt é diferente de zero, então uma corrente elétrica será induzida no circuito. Estes resultados experimentais são conhecidos como **lei de Faraday** a qual pode ser enunciada da seguinte forma:

A força eletromotriz induzida (fem) em um circuito fechado é determinada pela taxa de variação do fluxo magnético que atravessa o circuito.

A Lei de Faraday garante a geração de um campo magnético por um campo elétrico variável e a geração de um campo elétrico por um campo magnético variável. Esta Lei pode ser expressa por:

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Onde $\mathscr{E}$ é a força eletromotriz induzida (fem) e Φ é fluxo magnético dado por

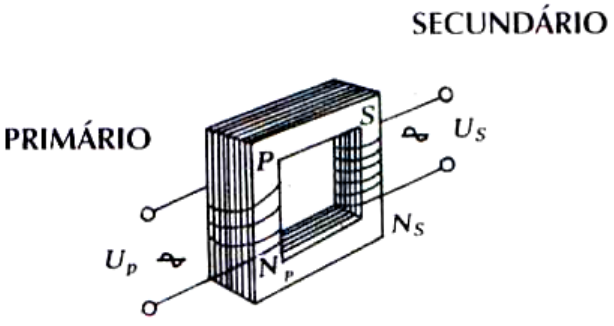
$$\Delta\Phi_B = \vec{B}\cdot\Delta\vec{S}$$

Sendo S a superfície por onde flui o campo magnético. Sabendo que a forca eletromotriz pode ser expressa em função do campo elétrico temos que;

$$\mathscr{E} = \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{\Delta\left(\vec{B}\cdot\Delta\vec{S}\right)}{\Delta t}$$

O sinal negativo que aparece na equação acima representa a direção da fem induzida.

Um exemplo típico da aplicação desta lei pode ser visto no princípio de funcionamento de transformadores. Sob a aplicação de uma tensão alternada em um dos seus terminais (primário), percorrerá um fluxo magnético variável em seu núcleo magnético resultando em uma tensão induzida alternada no outro terminal (secundário). Os níveis de tensão estarão associados ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário.



5.4 Circuitos Magnéticos Equivalentes

Quando os circuitos magnéticos são analisados para determinar o fluxo e a indução magnética nos principais caminhos através do núcleo, o campo magnético fora do núcleo e no entreferro são, usualmente, desprezados. Entretanto, quando dois ou mais enrolamentos estão colocados sobre um circuito magnético, como em transformadores ou máquinas rotativas, os

campos fora do núcleo, chamados campos de dispersão, são muito importantes na determinação do acoplamento entre os enrolamentos.

Ao longo do circuito magnético, o fluxo magnético ϕ (dado em Wb) é contínuo e definido como:

$$\phi = \int_s B da$$

Dentro do núcleo, a indução magnética pode ser considerada uniforme através da área A da seção transversal de modo que o fluxo é:

$$\phi = \mathrm{B} \cdot A$$

Que pode ser escrita em termos da indução magnética no núcleo:

$$Ni = \frac{B}{\mu} \cdot l = \frac{\phi \cdot l}{A \cdot \mu}$$

O termo Ni representado aqui por $\Im$ é chamado de força magnetomotriz (fmm). Os coeficientes do segundo membro são chamados de permeância P ou relutância $\Re$ e são definidos como:

$$\Re = \frac{1}{P} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

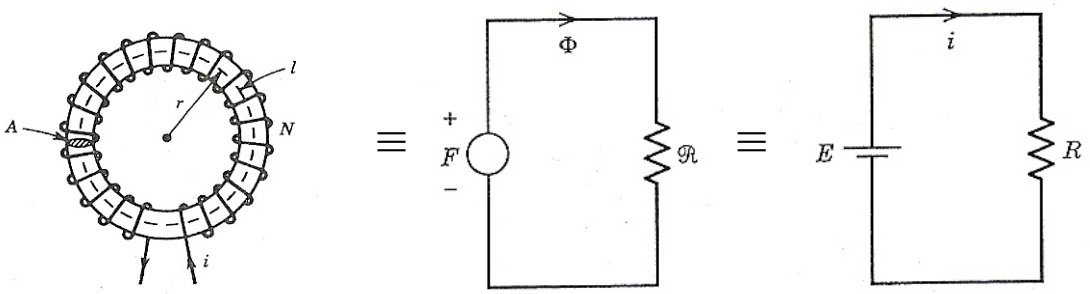
Logo a equação da indução magnética é reescrita como:

$$\Im = \Re \cdot \phi$$

Note que esta última equação é análoga a lei de Ohm (E=R I). Esta analogia com os circuitos elétricos nos permite representar o campo magnético por um circuito magnético equivalente e fazer a sua análise como um circuito elétrico, com as referências mostradas na tabela seguinte:

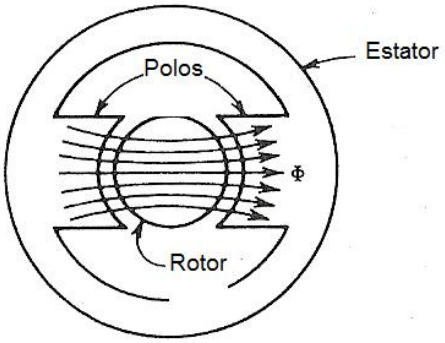
	CIRCUITO ELÉTRICO	CIRCUITO MAGNÉTICO
Uma fonte de	E(fem)	$\Im$ (fmm)
Produz um	$i = E / \Re$	$\phi = \Im / \Re$ [Wb]
Que é limitada	$\Re = \rho l / A$	$\Re = l / \mu \cdot A$

O circuito equivalente mostrado abaixo representa o campo magnético de uma bobina toroidal.



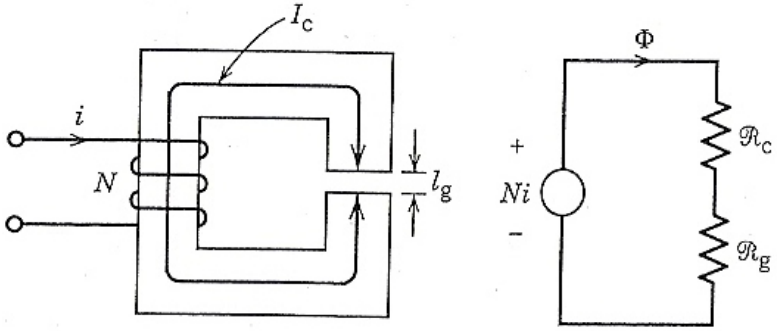
5.4.1 Circuito Magnético em Entreferro de Ar

Como já comentado, em transformadores e máquinas elétricas rotativas não se pode desprezar o campo magnético fora do núcleo. Em máquinas elétricas rotativas, o rotor está fisicamente isolado por um entreferro de ar. Na figura seguinte é representado um corte radial em uma máquina CC, onde se pode observar que, praticamente, o mesmo fluxo magnético está presente nos pólos (núcleo de material ferromagnético) e no entreferro (ar).



Naturalmente, para manter as mesmas densidades de fluxo, o entreferro exige uma fmm muito maior que o núcleo $\phi = \Im / \Re$, o que pode provocar a saturação do núcleo mantendo o entreferro não saturado pois a curva B-H do ar é linear, ou seja, μ é constante.

Um circuito magnético composto de caminhos magnéticos de diferentes materiais pode ser representado por suas respectivas relutâncias magnéticas, como é mostrado na seqüência:



Do circuito equivalente identificamos:

$$\Re c = \frac{lc}{\mu c \cdot Ac}$$

$$\Re g = \frac{\lg}{\mu g \cdot Ag}$$

$$\phi = \frac{\Im}{\Re} = \frac{Ni}{\Re c + \Re g}$$

$$Ni = Hc \cdot lc + Hg \cdot \lg$$

Onde:
lc = comprimento médio do núcleo
lg = comprimento do entreferro de ar

As densidades de fluxo são:

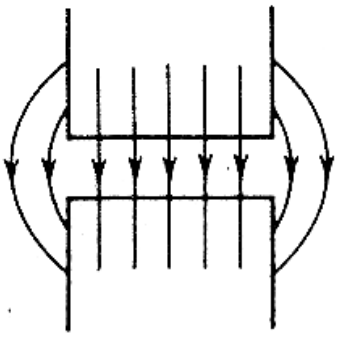
$$Bc = \frac{\phi c}{Ac}$$

$$Bg = \frac{\phi g}{Ag}$$

Verifica-se que Ag = Ac e que desprezando a distorção das linhas de fluxo, obtém-se:

$$Bg = Bc = \frac{\phi c}{Ac}$$

No entreferro de ar, as linhas de fluxo são arqueadas nas extremidades dos pólos (espraiamento), como ilustrado na figura abaixo. Este efeito é incrementado com o aumento da área do entreferro e pode ser desprezado para pequenos valores do mesmo.



5.5 Aplicações dos Materiais Magnéticos

Atualmente, os materiais magnéticos desempenham papel muito importante nas aplicações tecnológicas do magnetismo. Nas aplicações tradicionais, como em motores, geradores, transformadores, etc, eles são utilizados em duas categorias:

- ímãs permanentes são aqueles que têm a propriedade de criar um campo magnético constante.
- materiais doces, ou permeáveis, são aqueles que produzem um campo proporcional à corrente num fio nele enrolado, muito maior ao que seria criado apenas pelo fio sem nenhum outro material (núcleo de ar).

A terceira aplicação tradicional dos materiais magnéticos, que adquiriu grande importância nas últimas décadas, é a gravação magnética. Esta aplicação é baseada na propriedade que tem a corrente numa bobina, na cabeça de gravação, em alterar o estado de magnetização de um meio magnético próximo. Isto possibilita armazenar no meio a informação contida num sinal elétrico. A recuperação, ou a leitura, da informação gravada é feita, tradicionalmente, através da indução de uma corrente elétrica pelo meio magnético em movimento na bobina da cabeça de leitura. A gravação magnética é a melhor tecnologia da eletrônica para armazenamento não-volátil de informação que permite re-gravação. Ela é essencial para o funcionamento dos gravadores de som e de vídeo, de inúmeros equipamentos acionados por cartões magnéticos, e tornou-se muito importante nos computadores.

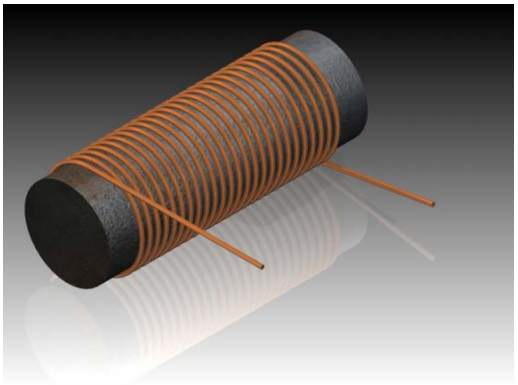
As aplicações mencionadas são baseadas em propriedades e fenômenos clássicos, todos conhecidos e compreendidos desde o início do século XX. A evolução tecnológica destas aplicações ocorreu em decorrência da descoberta de novos materiais, aperfeiçoamento das técnicas de preparação, etc. Porém, nos últimos 15 anos, a pesquisa em materiais magnéticos ganhou um grande impulso por conta de descobertas feitas com estruturas artificiais de filmes muito finos. Estes filmes podem ser preparados por vários métodos diferentes, dependendo da composição, espessura e aplicação. Todos eles se baseiam na deposição gradual de átomos ou moléculas do material desejado sobre a superfície de outro material que serve de apoio, chamado substrato. A fabricação de filmes ultrafinos, com espessuras da ordem ou fração de 1 nanômetro (1 nm = 10^{-9} m), tornou-se possível graças à evolução das técnicas de alto vácuo.

Hoje é possível fabricar estruturas artificiais controlando a deposição de camadas no nível atômico, com alto grau de perfeição e pureza. É também possível depositar sobre um filme com certa composição química, outro filme de composição diferente. Isto possibilita a fabricação de estruturas com propriedades magnéticas muito diferentes das tradicionais, cuja compreensão microscópica exige o conhecimento detalhado dos filmes, das interfaces e das interações entre os átomos. Estas estruturas compreendem filmes simples de uma única camada magnética

sobre um substrato, ou filmes magnéticos e não-magnéticos intercalados, e também estruturas com mais de uma dimensão na escala nanométrica, chamadas nano-estruturas magnéticas de maiores dimensões.

As diversas aplicações destes fenômenos na eletrônica estão dando origem a um novo ramo da tecnologia, chamado *spintrônica*, no qual as funções dos dispositivos são baseadas no controle do movimento dos elétrons através do campo magnético que atua sobre o spin.

5.3.1 Eletroímãs



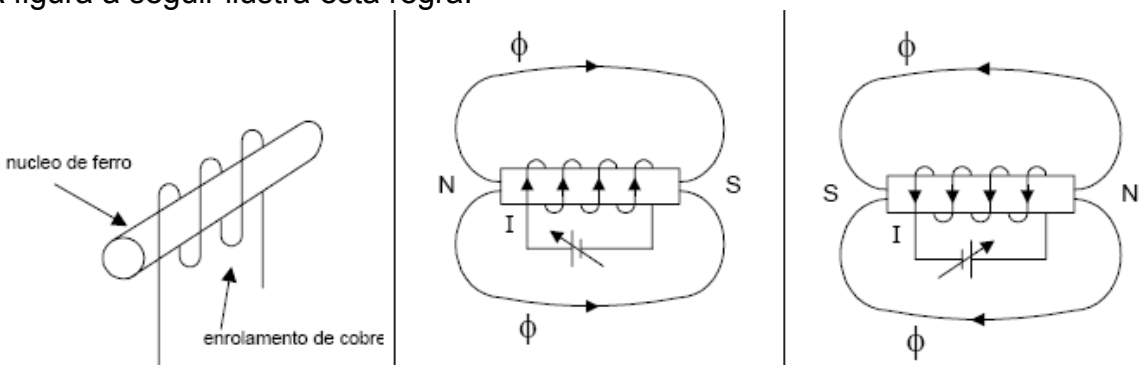
Eletroímã é um dispositivo que utiliza a eletricidade para gerar um campo magnético. Possui funcionamento muito similar aos ímãs permanentes.

Sua construção faz uso de um condutor elétrico, normalmente um fio ou barramento de cobre com exterior eletricamente isolado, o qual é moldado em forma espiral de modo a compor um enrolamento chamado de bobina. No centro desta bobina normalmente é utilizado um núcleo de material ferromagnético, podendo ser de ferro, aço, níquel ou cobalto.

Conforme visto anteriormente, todo campo magnético, ao ser passado através de um condutor elétrico gera corrente elétrica, e o contrário também ocorre, ou seja, toda corrente elétrica que passa por um condutor elétrico gera um campo magnético. O campo magnético gerado pela condução de uma corrente em um condutor retilíneo é muito pequena, praticamente imperceptível, mas quando o condutor é enrolado de forma espiralada, os pequenos campos gerados em cada parte do condutor se combinam, formando um único campo maior e de mesmo sentido.

No caso de uma bobina, para determinar o sentido das linhas de fluxo magnético, utiliza-se a regra da mão direita: ao se fechar a mão direita sobre uma bobina os dedos fechados indicam o sentido do fluxo de corrente, consequentemente o dedão indica o pólo norte do campo magnético gerado.

A figura a seguir ilustra esta regra.



Eletroímãs são utilizados em indústrias, veículos automotores, dentre outras aplicações. Nas indústrias, os eletroímãs são utilizados em relés eletrônicos e contatores elétricos, componentes muito comuns em automação industrial, máquinas e aparelhos eletroeletrônicos. Possuem também grande aplicação em siderúrgicas, para manipulação de produtos de ferro e aço. Veículos automotores utilizam eletroímãs em pequenos motores e no alternador, que utiliza o princípio de geração elétrica através do campo magnético. Monitores de computadores CRT's

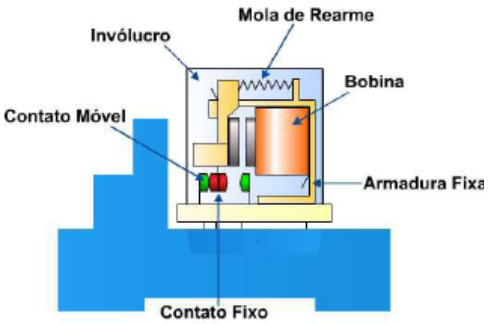
(mais antigos) utilizam eletroímãs para fazer correções na imagem da tela, com uma função chamada “Desmagnetizar”.

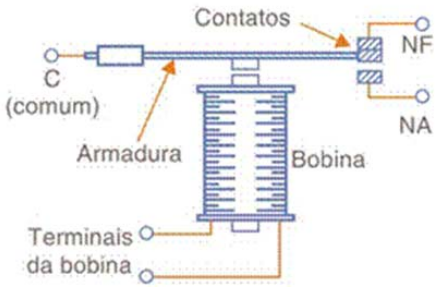
O eletroímã é a base do motor elétrico e do transformador. São empregados em freios e embreagens eletromagnéticos e para levantar ferro e sucata, assim como, são aplicados à tecnologia dos trens de levitação magnética (Maglev) estudada no item relativo a supercondutores.

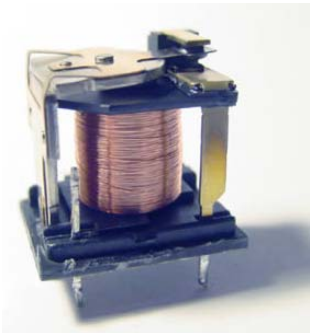
5.3.2 Relés

Um relé eletromecânico é um interruptor ou chave eletromecânica que normalmente é usado em circuitos que necessitam de cortes de energia.

A tecnologia mais antiga usada na fabricação de relés é a eletromagnética.







Em um **relé eletromagnético**, quando é atingido um determinado valor da corrente, o disparador do relé (um eletroímã) atua e ele abre, por exemplo, um circuito. Existe um determinado tempo de atuação. Este tipo de relé é usado na proteção contra curtos-circuitos.

Em um **relé térmico**, quando é atingida uma determinada temperatura, o relé dispara. Esta temperatura pode ser provocada por uma corrente que atingiu um valor determinado durante um tempo suficiente para atingir o limiar de disparo. O elemento sensor é, normalmente, uma lâmina bimetálica ou bi-lâmina. Conforme já visto este tipo de atuação é usado na proteção contra sobrecargas.

Há relés que se destinam a realizar operações de tipos diversos em automatismos. São chamados **relés auxilares** .

Existem ainda os **relés eletrônicos** que não têm peças móveis, o que os torna mais rápidos, menos consumidores de energia e menos sujeitos a avarias do que os demais.

RELÉ ELETROMAGNÉTICO

RELÉ TÉRMICO

RELÉ AUXILIAR

RELÉ ELETRÔNICO

Os relés podem ter diversas configurações quanto aos seus contatos: podem ter contatos NA, NF ou ambos, neste caso com um contato comum ou central (C).

Os contatos NA (normalmente aberto) são os que estão abertos enquanto a bobina não está energizada e que fecham, quando a bobina recebe corrente.

Os NF (normalmente fechado) abrem-se quando a bobina recebe corrente, ao contrário dos NA.

O contato central ou C é o comum, ou seja, quando o contato NA fecha é com o C que se estabelece a condução e o contrário com o NF.

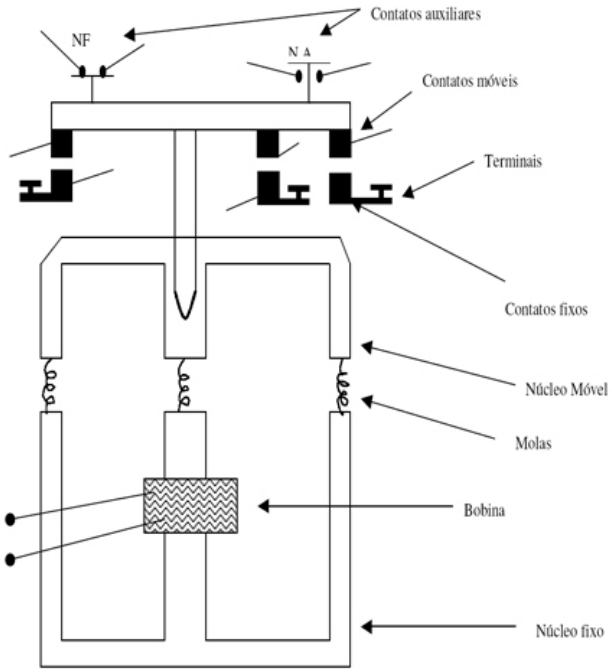
A principal vantagem dos Relés em relação aos SCR e os Triacs é que o circuito de carga está completamente isolado do de controle, podendo inclusive trabalhar com tensões diferentes entre controle e carga.

A desvantagem é o fator do desgaste, pois em todo o componente mecânico há uma vida útil, que é muito superior nos tiristores, por exemplo.

Os relés têm uma grande diversidade de aplicações, em várias áreas, como no setor de energia, automobilístico, na indústria, automações residenciais e comerciais. Devem ser observadas as limitações dos relés quanto a corrente e tensão máxima admitida entre os terminais. Se não forem observados estes fatores a vida útil do relé estará comprometida, ou até a do circuito controlado.

5.3.3 Contatores

Contator é um dispositivo eletromecânico que permite, a partir de um circuito de comando, efetuar o controle de cargas num circuito de potência. Tais cargas podem ser de qualquer tipo, desde tensões diferentes do circuito de comando e até conter múltiplas fases.



Os principais elementos construtivos de um contator são:

- Contato Principal;
- Contato Auxiliar;
- Sistema de Acionamento;
- Carcaça;
- Acessórios
- Contatos Principais

Os contatos principais têm a função de estabelecer e interromper correntes de motores e chavear cargas resistivas ou capacitivas. O contato é realizado por meio de placas de prata cuja vida útil termina quando as mesmas são reduzidas a 1/3 de seu valor inicial.

Os contatos auxiliares são dimensionados para comutação de circuitos auxiliares para comando, sinalização e intertravamento elétrico. Eles podem ser do tipo NA (normalmente aberto) ou NF (normalmente fechado) de acordo com a sua função.

O acionamento dos contatores pode ser feito com corrente alternada ou corrente contínua.

Após a desenergização da bobina de acionamento, o retorno dos contatos principais (bem como dos auxiliares) para a posição original de repouso é garantido pelas molas de compressão.

A carcaça é constituída de 2 partes simétricas (tipo macho e fêmea), unidas por meio de grampos.

O princípio de funcionamento do contator é através da atração magnética criada pela corrente elétrica ao atravessar um fio condutor. A bobina eletromagnética quando alimentada por um circuito elétrico forma um campo magnético que se concentra no núcleo fixo e atrai o núcleo móvel.

Como os contatos móveis estão acoplados mecanicamente com o núcleo móvel, o deslocamento deste no sentido do núcleo fixo movimenta os contatos móveis.

Quando o núcleo móvel se aproxima do fixo, os contatos móveis também devem se aproximar dos fixos, de tal forma que, no fim do curso do núcleo móvel, as peças fixas imóveis do sistema de comando elétrico estejam em contato e sob pressão suficiente.

O Comando da bobina é efetuado por meio de uma corrente elétrica que passa num circuito em série com a bobina. A velocidade de fechamento dos contatores é resultado da força proveniente da bobina e da força mecânica das molas de separação que atuam em sentido contrário.

As molas são também as únicas responsáveis pela velocidade de abertura do contator, o que ocorre quando a bobina magnética não estiver sendo alimentada ou quando o valor da força magnética for inferior à força das molas.

Basicamente, existem contatores para motores e contatores auxiliares.

Os **contatores para motores** têm as seguintes características:

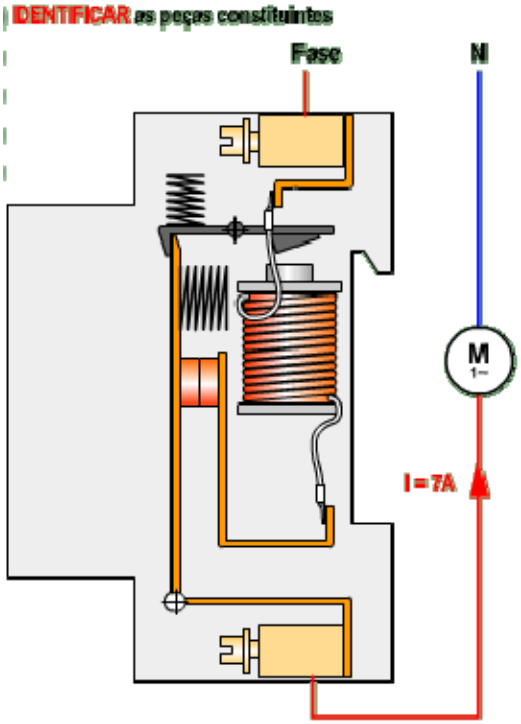
- Dois tipos de contatos com capacidade de carga diferentes (principal e auxiliares);
- Maior robustez de construção;
- Possibilidade de receber relés de proteção;
- Existência de câmara de extinção de arco voltaico;
- Variação de potência da bobina do eletroímã de acordo com o tipo do contator;
- Tamanho físico de acordo com a potência a ser comandada;
- Possibilidade de ter a bobina do eletroímã secundário;

Os **contatores auxiliares** são utilizados para aumentar o número de contatos auxiliares dos contatores de motores para comandar contatores de elevado consumo e para sinalização. Possuem as seguintes características:

- Tamanho físico variável conforme o número de contatos
- Potência da bobina do eletroímã praticamente constante
- Corrente nominal de carga máxima de 10 A para todos os contatos
- Ausência de necessidade de relê de proteção e de câmara de extinção

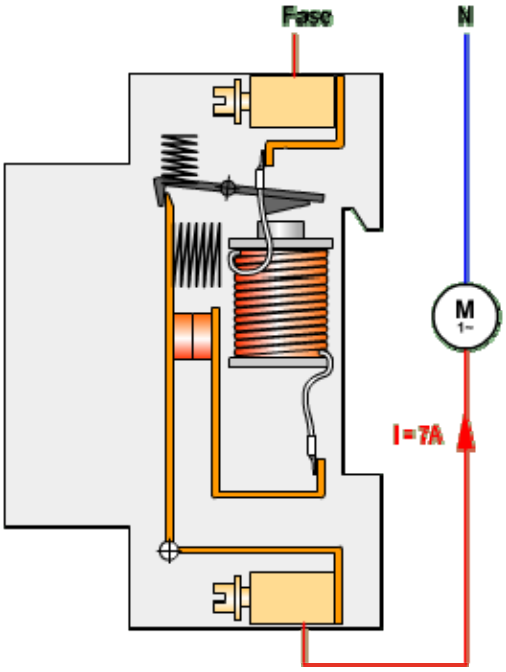
5.3.4 Disjuntores Termo-magnéticos

Os disjuntores termo-magnéticos utilizam de dois dispositivos de proteção: o primeiro para sobrecarga que emprega a tecnologia dos bimetais (visto no capítulo II) e o segundo para proteção contra curtos-circuitos, através da tecnologia dos circuitos magnéticos. As figuras a seguir ilustram passo a passo este processo.



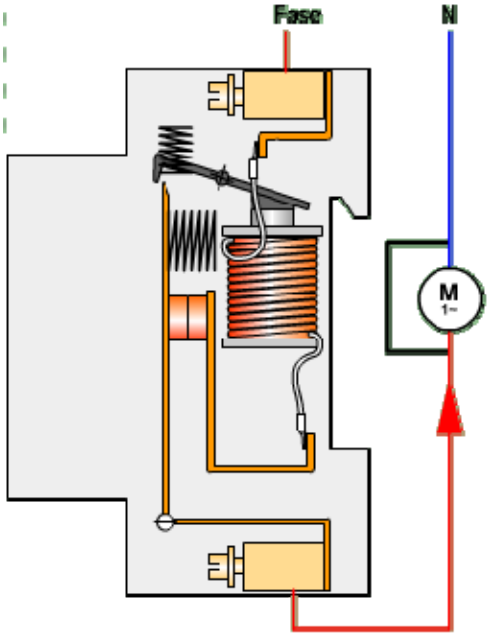
DISPOSITIVO MAGNÉTICO

em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A



em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Supunhamos agora que o fio de fase toca no fio do neutro devido a um defeito de isolamento.

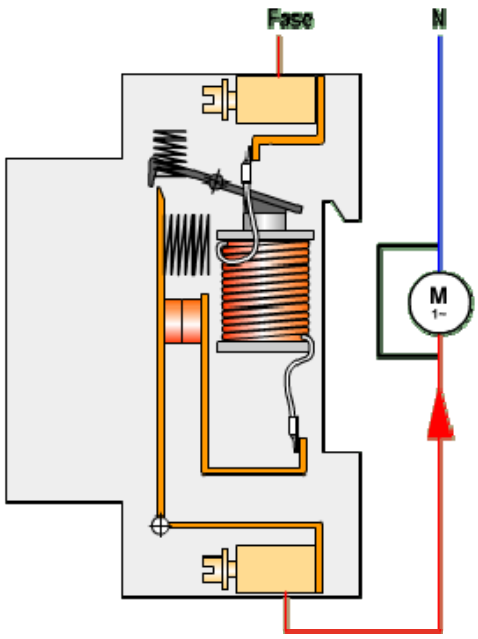


em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Supunhamos agora que o fio de fase toca no fio do neutro devido a um defeito de isolamento.

Estamos numa situação de CURTO-CIRCUITO.

A bobina electromagnética, sob o efeito da elevação da intensidade de corrente vai instantaneamente atrair a peça elevadora e provocar uma abertura rápida (10 a 20ms) do disjuntor.
esta reacção obtém-se a partir de um limiar de corrente variável de 3 a 14 vezes o calibre do disjuntor: o limiar magnético Im.

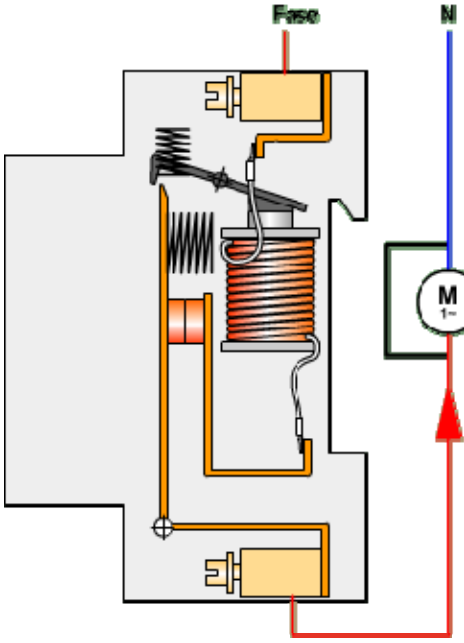


em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Supunhamos agora que o fio de fase toca no fio do neutro devido a um defeito de isolamento.

Estamos numa situação de CURTO-CIRCUITO.

A bobina electromagnética, sob o efeito da elevação da intensidade de corrente vai instantaneamente atrair a peça elevadora e provocar uma abertura rápida (10 a 20ms) do disjuntor.
esta reacção obtém-se a partir de um limiar de corrente variável de 3 a 14 vezes o calibre do disjuntor: o limiar magnético Im.

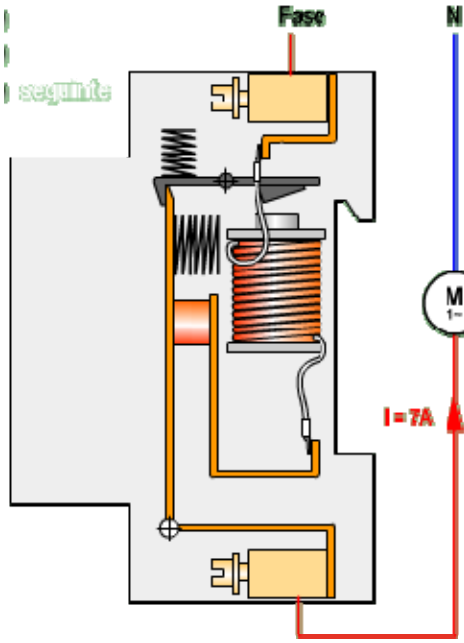


em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Supunhamos agora que o fio de fase toca no fio do neutro devido a um defeito de isolamento.

Estamos numa situação de CURTO-CIRCUITO.

A bobina electromagnética, sob o efeito da elevação da intensidade de corrente vai instantaneamente atrair a peça elevadora e provocar uma abertura rápida (10 a 20ms) do disjuntor.
esta reacção obtém-se a partir de um limiar de corrente variável de 3 a 14 vezes o calibre do disjuntor: o limiar magnético Im.



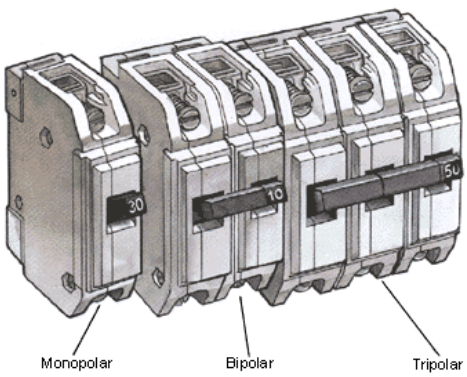
seguinte

em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Supunhamos agora que o fio de fase toca no fio do neutro devido a um defeito de isolamento.

Estamos numa situação de CURTO-CIRCUITO.

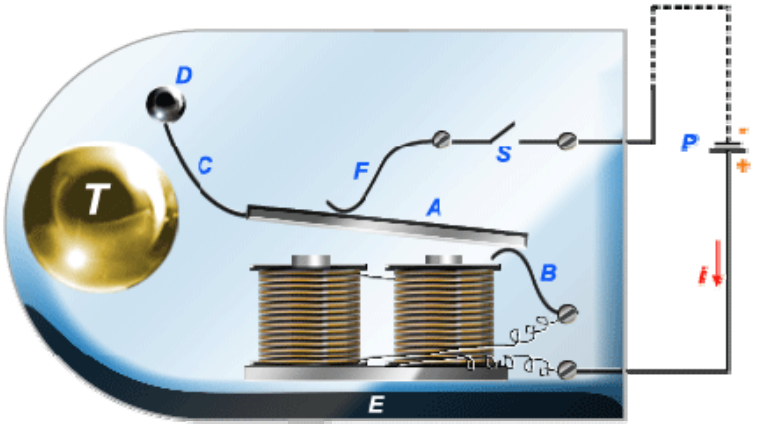
A bobina electromagnética, sob o efeito da elevação da intensidade de corrente vai instantaneamente atrair a peça elevadora e provocar uma abertura rápida (10 a 20ms) do disjuntor.
esta reacção obtém-se a partir de um limiar de corrente variável de 3 a 14 vezes o calibre do disjuntor: o limiar magnético Im.
Uma vez a avaria que provocou o disparo eliminada, podemos rearmar o disjuntor e voltar a colocar a instalação em funcionamento.



5.3.5 Campainha

A campainha é composta por um eletroímã E, cuja armadura A tem uma extremidade presa a uma mola de aço flexível B e a outra extremidade a uma haste C que mantém na ponta uma esfera D.

A mola B obriga a armadura a ficar em contato com uma placa metálica F . A corrente é fornecida por uma pilha P, ou pelo circuito que serve a uma residência, conforme a figura a seguir.



Quando se fecha a chave S a corrente segue o seguinte caminho: eletroímã, mola B, armadura A, placa F chave S e volta à pilha. Mas, logo que a corrente passa acontece o seguinte:

1º) o eletroímã atrai a armadura; esta leva consigo a haste C, e a esfera D bate no tímpano T ;

2º) quando a armadura é atraída, ela se afasta da placa F e o circuito se abre;

3º) com o circuito aberto, cessa a atração sobre a armadura, e a mola B leva novamente a armadura em contato com F ;

4º) então o circuito se fecha, e tudo se repete. Assim, enquanto a chave S permanecer fechada, a esfera D alternadamente bate no tímpano e recua. Essa chave S é o que vulgarmente é chamado de o “botão” da campainha; quando o mesmo é acionado, é fechado o circuito.

5.3.6 Motores e Geradores Elétricos

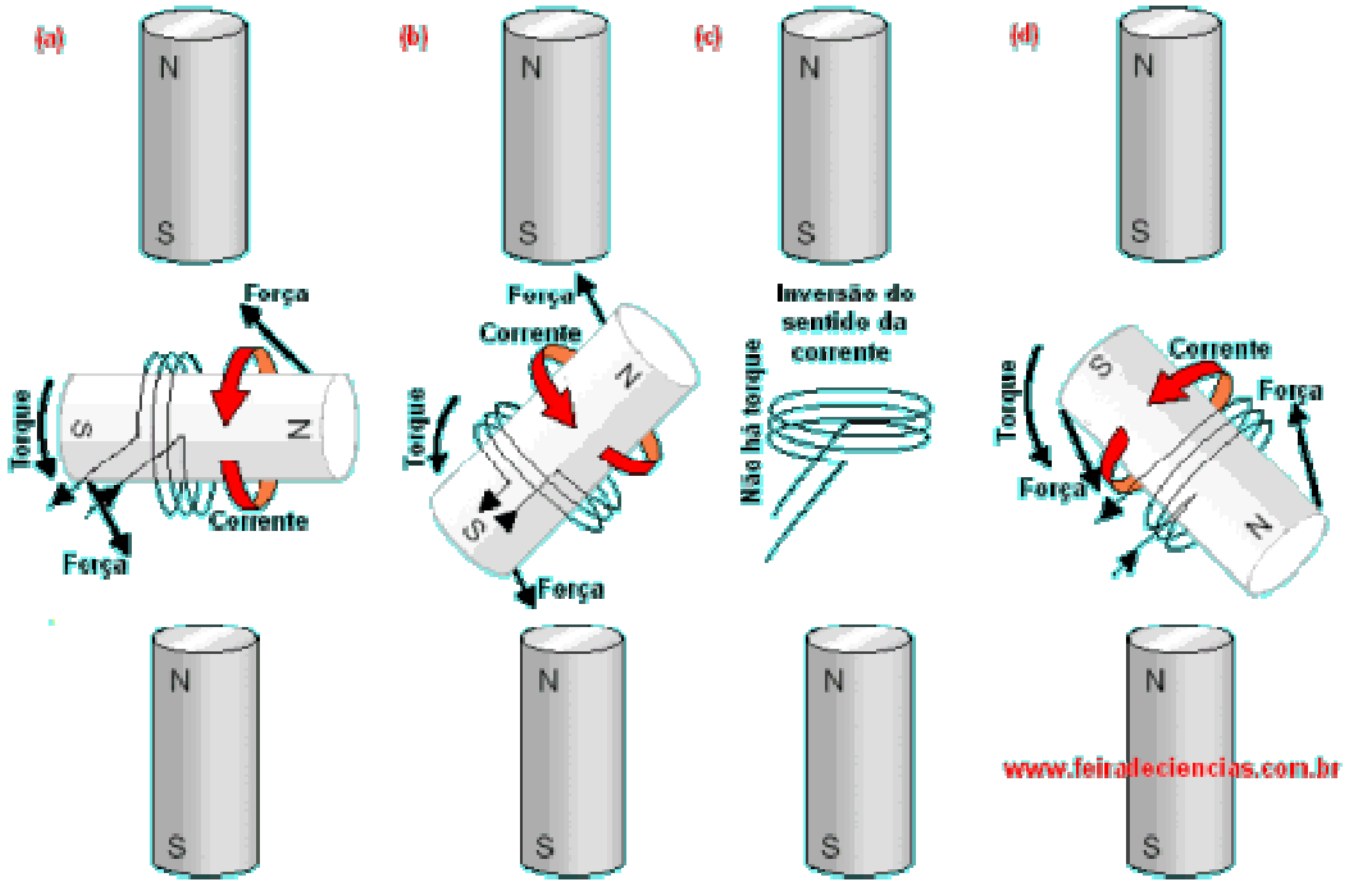
Motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica. O gerador realiza o processo inverso, transforma energia mecânica em energia elétrica.

Os motores elétricos, essencialmente, são compostos por duas partes:

- Rotor: que é a parte móvel
- Estator ou Carcaça: que é a parte fixa

O rotor do motor precisa de um torque para iniciar o seu giro. Este torque (momento) normalmente é produzido por forças magnéticas desenvolvidas entre os pólos magnéticos do rotor e aqueles do estator. Forças de atração ou de repulsão, desenvolvidas entre estator e rotor, puxam ou empurram os pólos móveis do rotor, produzindo torques, que fazem o rotor girar mais e mais rapidamente, até que os atritos ou cargas ligadas ao eixo reduzam o torque resultante ao valor 'zero'.

Após este ponto, o rotor passa a girar com velocidade angular constante. Tanto o rotor como o estator devem ser 'magnéticos', pois são estas forças entre pólos que produzem o torque necessário para fazer o rotor girar. A figura a seguir mostras as etapas deste processo.



Os motores elétricos podem ser:

a) **Motor de corrente contínua** (CC) : Na maioria dos motores elétricos CC, o rotor e um eletroímã que gira entre os pólos de ímãs permanentes estacionários. Para tornar esse eletroímã mais eficiente o rotor contém um núcleo de ferro, que se torna fortemente magnetizado, quando a corrente flui pela bobina. O rotor girará desde que esta corrente inverta seu sentido de percurso cada vez que seus pólos alcançam os pólos opostos do estator. O modo mais comum para produzir tais reversões é usando um comutador.

b) **Motor síncrono**: funciona com velocidade estável; utiliza-se de um induzido que possui um campo constante pré-definido e, com isto, aumenta a resposta ao processo de arraste criado pelo campo girante. É geralmente utilizado quando se necessita de velocidades estáveis sob a ação de cargas variáveis. Também pode ser utilizado quando se requer grande potência, com torque constante.

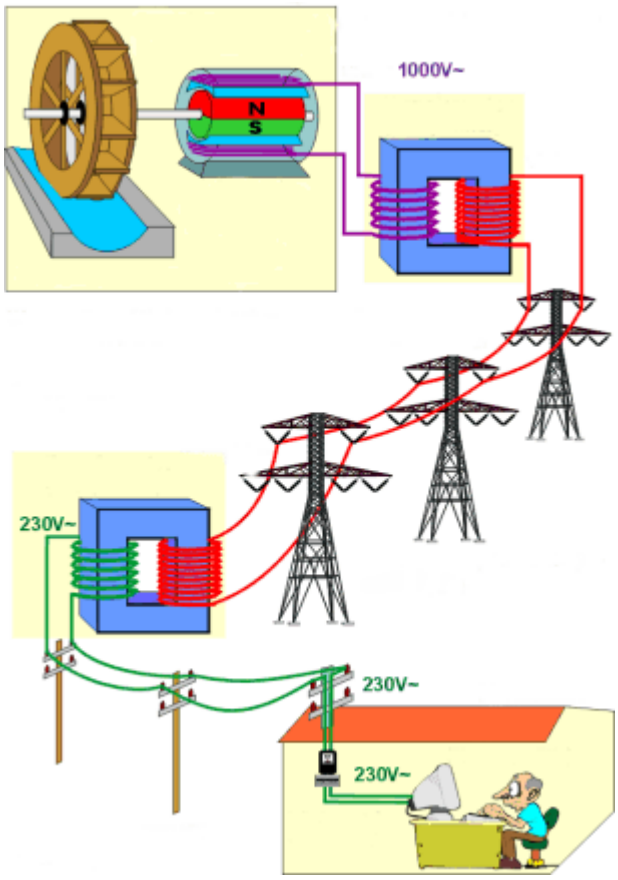
c) **Motor de indução:** funciona normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo

adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de conversores de freqüência.

5.3.7 Transformadores

Um transformador é um dispositivo destinado a transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito à outro, transformando tensões, correntes e ou de modificar os valores das Impedâncias de um circuito elétrico. Trata-se de um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday e da Lei de Lenz.

Consiste de duas ou mais bobinas ou enrolamentos e um "caminho", ou circuito magnético, que "acopla" estas bobinas. Há uma variedade de transformadores com diferentes tipos de circuito, mas todos operam sobre o mesmo princípio de indução eletromagnética.

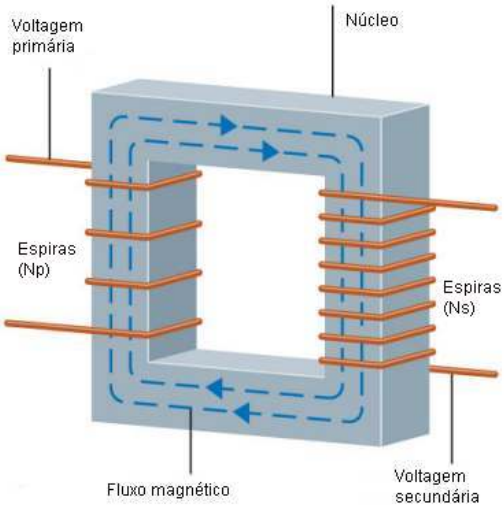


No caso dos transformadores de dois enrolamentos, é comum denominá-los como enrolamento primário e secundário. Existem transformadores de três enrolamentos sendo que o terceiro é chamado de terciário. Existe também um tipo de transformador denominado autotransformador, no qual o enrolamento secundário possui uma conexão elétrica com o enrolamento do primário.

Transformadores de potência são destinados primariamente à transformação da tensão e das correntes operando com altos valores de potência, de forma a elevar o valor da tensão e conseqüentemente reduzir o valor da corrente. Este procedimento é utilizado, pois ao se reduzir os valores das correntes, reduzem-se as perdas por efeito Joule nos condutores. O transformador é constituído de um núcleo de material ferromagnético, como aço, a fim de produzir um caminho de baixa relutância para o fluxo gerado.

Geralmente o núcleo de aço dos transformadores é laminado para reduzir a indução de correntes parasitas ou de corrente de Foucault no próprio núcleo, já que essas correntes contribuem para o surgimento de perdas por aquecimento devido ao efeito Joule. Também se utilizam aço-silício com o intuito de se diminuir as perdas por histerese.

Outra aplicação para os transformadores é a sua utilização para o casamento de impedâncias, que consiste em modificar o valor da impedância vista pelo lado primário do transformador, geralmente os de baixa potência. Há outros tipos de transformadores, como os com núcleo de ferrite com grande aplicação na eletrônica.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

V. Schmidt, "Materiais elétricos: condutores e semicondutores v. 1", São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1979.

V. Schmidt, "Materiais elétricos: isolantes e magnéticos v. 2", São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1979.

S.M. Rezende A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos, Editora da Universidade Federal de Pernambuco, 1996.

D. B. Saraiva, "Materiais elétricos", Editora Guanabara Dois, 1988.

W.D. Callister Jr, L.M. Van Vlack, "Princípios de ciência e tecnologia dos materiais", Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

Smith, William F.;Principios de ciência e engenharia dos materiais. ISBN: 972-8298-68-4

Askeland, Donald R.;The science and engineering of materials. ISBN: 0-534-55396-6

W. Smith – Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, McGraw-Hill, 3ªed., 1998

B - M. Ashby e D. Jones – Engineering Materials 1 – An introduction to their properties & applications, Butterworth Heinemann, 2ªed.,1998.

B- M. Ashby e D. Jones – Engineering Materials 2 – An introduction to microstructures, processing & design, Butterworth Heinemann, 2ªed.,1998.

BARANAUSKAS,Vitor. Tecnologia dos Cristais de Silício em Microeletrônica. Editora da Unicamp.Campinas.1990.

BARANAUSKAS,Vitor. Técnicas Instrumentais de Caracterização de Semicondutores. Editora da Unicamp.Campinas.1989.

CALLISTER Jr., William D. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro2002.

COLOMBO,R. Disjuntores de Alta Tensão. Siemens/Nobel. São Paulo.1986.

LUIZ, Adir M. Aplicações da Supercondutividade. Editora. Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1992.

MAMEDE Fº, João. Manual de Equipamentos Elétricos. Livros Técnicos e Científicos. Editora.Volumes 1 e 2 . Rio de Janeiro.1994

MILASCH, Milan. Manutenção de Transformadores em Líquidos Isolantes.Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo.1985.

PADILHA, Angelo F. Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades. Hemus Editora. São Paulo.1997.

PIERCE, J. Frank Dispositivos de Junção Semicondutores. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo.1972.

SARAIVA, Delcyr B. Materiais Elétricos. Editora Guanabara. Rio de Janeiro.1988.

SCHIMIDT, Walfredo. Materiais Elétricos. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1979.

VAN VLACK, Laurence. Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. Editora Campus. Rio de Janeiro. 1984.

WERNECK, Marcelo M. Transdutores e Interfaces. LTC. Rio de Janeiro. 1996

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C. J., UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 6ª ed. McGraw- Hill, 2006

KOSOW, Irving L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 8ª ed. São Paulo: Globo, 1989.
DEL TORO, Vicent. Fundamentos de Máquinas Elétricas. LTC-Livros Técnicos e Científicos S/A

FALCONE, A. G., Eletromecânica Edgard Blucher, 2001
SEN, P. C., Principles of Electric Machines and Power Electronics. 2ª ed. John Wiley & Sons 1997

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais, 6ª ed. LTC, 2007.

SEN, P. C., Principles of Electric Machines and Power Electronics. 2ª ed. John Wiley & Sons 1997

www.teletronica.kit.net

http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/supercondutividade/supercondutividade1.htm

http://www.feiradeciencias.com.br/sala08/08_35.asp

http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/capacitadores/capacitadores-1.php

www.geocities.yahoo.com.br

http://www.fisica-potierj.pro.br/poligrafos/capacitores.htm

http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/capacitores.pdf

http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/capacitores.pdf

http://pt.wikipedia.org/wiki/Term%C3%ADstor

Lucínio Preza de Araújo http://www.prof2000.pt/users/lpa

http://www.wkoch.com.br/2008/09/17/imas-permanentes-e-eletroimas/

http://www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano14.htm

http://br.geocities.com/jcc5003/oqueecurvademagnetizacao.htm

http://www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano14.htm